

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**MAJA SUDAR**

**DETEKTOR IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA –  
GEIGER – MÜLLEROV BROJAČ**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2016.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**MAJA SUDAR**

**DETEKTOR IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA –  
GEIGER – MÜLLEROV BROJAČ**

**Diplomski rad**

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku radi stjecanja zvanja magistra  
edukacije fizike i informatike

**Osijek, 2016.**

Ovaj diplomski rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Branka Vukovića i sumentora Igora Miklavčića, pred. u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

*Zahvaljujem se roditeljima, sestrama i Josipu na podršci!*

Odjel za fiziku

# **DETEKTOR IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA – GEIGER – MÜLLEROV BROJAČ**

**MAJA SUDAR**

## **Sažetak**

Diplomski rad s temom Detektor ionizirajućeg zračenja – Geiger – Müllerov brojač sastoji se od dva dijela. U prvom, teorijskom, dijelu rada opisano je otkriće radioaktivnosti te najznačajnije činjenice vezane za radioaktivnost. Nakon toga su opisani različiti detektori zračenja i njihove karakteristike. Detaljno se opisuje Geiger – Müllerov brojač, njegova povijest, područje rada, princip rada te druge bitne karakteristike. U drugom, eksperimentalnom, dijelu rada predstavljeni su rezultati dobiveni eksperimentima pomoću Geiger – Müllerova brojača.

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** detektori zračenja / Geiger – Müllerov brojač / ionizirajuće zračenje / radioaktivnost

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Branko Vuković

**Sumentor:** Igor Miklavčić, pred.

**Ocjenjivači:** izv. prof.dr. sc. Vanja Radolić, mr. sc. Slavko Petrinšak

**Rad prihvaćen:** 08. rujna 2016.

## **DETECTOR OF IONIZING RADIATION – GEIGER – MÜLLER COUNTER**

**MAJA SUDAR**

### **Abstract**

Master thesis with the topic Detector of ionizing radiation – Geiger – Müller counter is divided into two parts. In the first, theoretical, part of this work the discovery of radioactivity and the most important facts of radioactivity are described. Later on, different radiation detectors and their characteristics are described. Geiger – Müller counter is described in detail; its history, scope, work principles and some other important properties. In the second, experimental, part of this work, the results of the radiation measurements of different materials using Geiger – Müller counter are presented.

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** Geiger - Müller counter / ionizing radiation / radiation detectors / radioactivity

**Supervisor:** PhD, Associate Professor Branko Vuković

**Co-supervisor:** Igor Miklavčić, Lecturer

**Reviewers:** PhD, Associate Professor Vanja Radolić, mr. sc. Slavko Petrinšak,

**Thesis accepted:** September 08., 2016.

# Sadržaj

Uvod.....	1
Teorijski dio .....	2
Radioaktivnost.....	2
Otkriće radioaktivnosti .....	2
Ionizirajuće zračenje .....	5
Vrste ionizirajućeg zračenja .....	6
Uređaji za zapažanje i mjerenje ionizirajućeg zračenja.....	12
Geiger – Müllerov brojač .....	19
Povijest Geiger – Müllerova brojača .....	20
Područje rada Geiger – Müllerova brojača.....	23
Princip rada Geiger – Müllerova brojača .....	25
Vrste Geiger – Müllerove cijevi prema primjeni.....	27
Uređaj za očitavanje .....	28
Plato Geiger – Müllerova brojača.....	29
Mrtvo vrijeme Geiger – Müllerova brojača.....	30
Efikasnost Geiger – Müllerova brojača .....	31
Eksperimentalni dio .....	32
Pozadinsko zračenje .....	32
Određivanje mrtvog vremena Geiger – Müllerova brojača .....	34
Ovisnost broja detektiranih čestica o udaljenosti .....	37
Detekcija zračenja različitih izvora na istoj udaljenosti.....	41
Prolazak $\alpha$ , $\beta$ i $\gamma$ – zračenja kroz različite materijale.....	44
Zaključak.....	48

Literatura.....	49
Životopis .....	53



## Uvod

U svakidašnjem životu česta je primjena ionizirajućeg zračenja, a zračenja se pojavljuju i kao neželjeni nusproizvod pri uporabi nuklearne energije. Zbog toga se sve više ljudi interesira za ionizirajuće zračenje i njegove učinke kako bi saznali koje su njegove dobre, a koje loše strane.

Ionizirajuće zračenje je neobična pojava koja se razlikuje od svih drugih prirodnih pojava koje poznajemo. Čovjek i ostala živa bića nemaju osjetilo za zapažanje ionizirajućeg zračenja. Čovjek može biti izložen smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja, a da u samom trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice ozračivanja zapažaju se tek nakon nekog vremena, što može biti nekoliko sati, dana, pa čak i godina. Zbog toga je čovjekov strah od ove pojave sasvim razumljiv, te je važno poznavanje osnovnih svojstava ionizirajućeg zračenja, međudjelovanja zračenja s tvarima, a posebno djelovanja zračenja na živa bića. [1]

Budući da ljudi nemaju osjetilo za zapažanje ionizirajućeg zračenja potrebni su nam uređaji koji će to učiniti umjesto nas. Detektori zračenja su najjednostavniji uređaji pomoću kojih se zapaža zračenje. Postoje mnogi uređaji koji su napravljeni za detekciju i mjerenje zračenja, a može ih se razvrstati u tri osnovne skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Osim ovih uređaja postoje i razni uređaji posebnih namjena.

U ovom radu posebnu pažnju ću posvetiti jednom od tih uređaja, a to je Geiger – Müllerov brojač koji se danas najčešće upotrebljava za mjerenje ionizirajućeg zračenja. Često ga možemo naći i pod drugim imenima kao što su Geigerov brojač, G – M brojač, Geiger – Müllerova cijev, Geigerova cijev i slično. Njemački fizičar Hans Geiger je konstruirao prvobitnu verziju ovog uređaja, a kasnije ju je unaprijedio zajedno s njemačkim znanstvenikom Waltherom Müllerom.

# Teorijski dio

## Radioaktivnost

Radioaktivnost je svojstvo nekih vrsta atoma da im se jezgre spontano mijenjaju i pri tome emitiraju nuklearne čestice i/ili elektromagnetsko zračenje, odnosno energiju u obliku zračenja. Tu pojavu nazivamo radioaktivnim raspadom. Čestice koje jezgra emitira pri radioaktivnom raspadu nazivaju se radioaktivno zračenje. Radioaktivno zračenje mijenja strukturu i svojstva materijala kroz koji prolazi. Najznačajniji efekt pri tome je ionizacija. Ukoliko neka vrsta elektromagnetnog zračenja ne posjeduje dovoljno energije da može izazvati ionizaciju tada govorimo o neionizirajućem zračenju. [1, 2]

## Otkriće radioaktivnosti

Znanstvenici koji su prvi proučavali radioaktivnost bili su H. A. Becquerel, M. i P. Curie, E. Rutherford te P. Villard.

Prirodnu radioaktivnost otkrio je francuski fizičar Antoine Henry Becquerel (Slika 1) 1896. godine istražujući luminiscenciju. Becquerelov otac, Alexander Edmond Becquerel, je proučavao luminiscenciju i fosforescenciju te je zapazio da određene tvari emitiraju nevidljivo zračenje kada se izlože svjetlosti, ali nije se posvetio detaljnijem proučavanju ove pojave. Henry Becquerel je uočio da uranijeve soli emitiraju nevidljivo zračenje koje djeluje na fotografsku ploču kroz zaštitni papir slično kao i rendgenske zrake. U početku je mislio da je luminiscencija minerala (dvosol kalijeva i uranijeva sulfata) koje je koristio u pokusima uvjetovana korištenjem svjetlosti koja ih pobuđuje na zračenje, no ubrzo je ustanovio da neki minerali emitiraju zračenje „sami po sebi“, bez prethodnoga izlaganja svjetlosti. Zračenje je nazvano uranijevim, a ubrzo poslije toga i Becquerelovim zrakama. Becquerel je na fotografsku ploču, koja je bila zamotana u crni papir, stavio mineral (dvosol kalijeva i uranijeva sulfata) posebnog oblika i ostavio je nekoliko sati na jakom Sunčevom svjetlu. Poslije razvijanja fotografske ploče na njoj je bila jasna slika minerala. Becquerel je ubrzo ustanovio da sunčevo svjetlo nije pobudilo mineral dvosoli na emitiranje zraka koje su djelovale na fotografsku ploču. Naime, pri izvođenju pokusa nekoliko je dana bilo oblačno i mineral nije mogao izložiti djelovanju Sunčeva svjetla. Bio je iznenađen kad je razvio fotografsku

ploču. Mineral je i bez prethodnog osvjtljavanja Sunčevim svjetlom ispuštao nevidljive zrake i tako djelovao na fotografsku ploču kroz papir. U daljnjim je pokusima Becquerel pokazao da zrake mogu ispuštati samo spojevi uranija. Becquerel je utvrdio da zbog uranijevih zraka zrak postaje vodič elektriciteta, jer one vrše ionizaciju zraka i tako neutraliziraju nabijeni elektroskop. [1, 3, 4]



Slika 1. Antoine Henry Becquerel [3]

Marie Curie (rođ. Skłodowska) (Slika 2) bila je poljska kemičarka. Rođena je u Poljskoj gdje je provela rane godine života. Isticala se svojom marljivošću i radnim navikama, odbijala je čak i hranu i san da bi učila. Nakon što je završila srednju školu doživjela je živčani slom. Zbog njenog spola i ruske odmazde Poljskoj nije se mogla upisati na sveučilište i zato je morala nekoliko godina najprije raditi. S 24 godine uz sestrinu financijsku pomoć odlazi studirati u Pariz. Upisala je studij fizike i kemije. Kasnije ostaje raditi na tom sveučilištu te postaje prva žena – predavač. Na sveučilištu je upoznala Piere Curiea koji je tamo predavao te se godinu dana kasnije udala za njega. Zajedno su proučavali radioaktivne materijale, posebno uranij i uranijev smolinac, koji je bio radioaktivniji nego uranij izlučen iz njega. 1898. donijeli su logičan zaključak da uranijev smolinac sadrži neku nepoznatu komponentu, radioaktivniju od uranija. Dana 26. prosinca 1898. Marie je objavila postojanje nove tvari. [1, 5, 6]

Nakon nekoliko godina neprekidnog rada i pročišćavanja nekoliko tona uranijevog smolinca uspjeli su izolirati dva nova kemijska elementa. Prvog su nazvali polonij po Poljskoj, a drugi radij zbog njegovog jakog intenziteta radioaktivnosti. [5]

U svojim istraživanjima također su došli i do zaključka kako se na pojavu zračenja ne može utjecati električnom strujom, zagrijavanjem, kemijskim reakcijama i slično, da se radioaktivni kemijski elementi pretvaraju jedni u druge i da je vjerojatnost raspada neovisna o starosti pojedinog atoma. [6]



Slika 2. Marie Curie [6]

Marie Curie, Pierre Curie i Henry Becquerel podijelili su Nobelovu nagradu za fiziku 1903. godine. Osam godina kasnije M. Curie je dobila i Nobelovu nagradu za kemiju.

Marie Curie je bila prva žena koja je osvojila Nobelovu nagradu. Bila je također prva osoba koja je osvojila dvije Nobelove nagrade, jedna je od dvije osobe koja je osvojila Nobelovu nagradu u dva različita područja. Osnovala je institut Curie u Parizu i Varšavi. Po njoj je nazvana i mjerna jedinica za radioaktivnost – kiri (Ci). Umrla je 1934. godine, a uzrok smrti je bila leukemija, najvjerojatnije uzrokovana prevelikom izlaganju radijaciji tijekom istraživanja. [5, 6]

Ernest Rutherford otkrio je 1899. da se zračenje radija sastoji od dvije komponente koje se različito apsorbiraju u tvarima. Onu vrstu zraka koje ne mogu proći kroz aluminijsku pločicu debljine 0,02 mm nazvao je  $\alpha$  – česticama, a onu vrstu koja je prolazila i kroz deblje slojeve nazvao je  $\beta$  – česticama. Na osnovu skretanja u magnetskom polju, utvrđeno je da  $\alpha$  – čestice imaju pozitivni električni naboj, a  $\beta$  – čestice negativan električni naboj. [7, 8]

Paul Villard je 1900. otkrio još prodorniju komponentu,  $\gamma$  – zrake. Ernest Rutherford i Frederick Soddy su 1902. godine na temelju analize gibanja zraka u magnetskom polju objasnili prirodu radioaktivnosti. [7]

## Ionizirajuće zračenje

U prirodi se atomi nalaze u neutralnom stanju, svaki atom treba imati jednak broj protona i jednak broj elektrona. Njihovi naboji se međusobno poništavaju pa nemamo nikakav naboj atoma kao cjeline. Zbog djelovanja izvana, elektron se može izbaciti iz elektronskog omotača u atomu pri čemu jedan proton ostaje bez kompenzacije naboja u omotaču pa se ukupno atom pokazuje kao nabijen s pozitivnim nabojem  $+1$ . Takav atom, odnosno česticu, zovemo ion, a proces stvaranja nabijenih čestica iz neutralnih čestica ionizacija. Zračenje koje može izazvati ionizaciju zovemo ionizirajućim zračenjem. [1, 9]

Ionizirajuće zračenje je pojava za koju ljudska osjetila nisu razvijena, to je pojava koja se bitno razlikuje od mnogih drugih pojava u prirodi koje poznajemo. Posljedice koje ima čovjek, a isto tako i ostala živa bića koja su izložena ionizirajućem zračenju nisu vidljive odmah i teško ih se može povezati s uzrokom. Mnoge pojave oko sebe čovjek primjećuje i proučava još od davnina, dok je situacija s ionizirajućim zračenjem iznimka iako je čovjek oduvijek izložen kozmičkom zračenju i okružen prirodnim radioaktivnim tvarima. Moguće je da čovjek bude izložen i smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja, a da u trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice ozračivanja zapažaju se tek nakon nekog vremena, što može biti nekoliko sati, dana pa sve do nekoliko godina, ovisno o vrsti i svojstvima zračenja kojima je čovjek bio izložen. [1, 9]

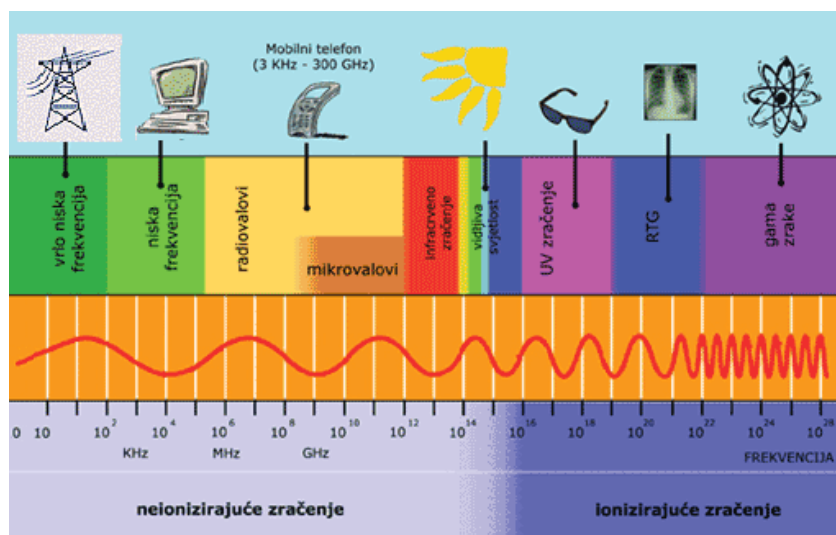
Ionizirajuće zračenje ima dovoljnu energiju da u međudjelovanju s tvari ionizira tu tvar. Ionizirajuće zračenje posljedica je promjene materije u mikrosvijetu. To su promjene energijskog stanja atoma ili sastava atoma i atomske jezgre, pri čemu se emitiraju kvanti energije koje nazivamo fotonima i/ili elementarne čestice. Prilikom susreta zračenja s tvarima nastaju vrlo složena međudjelovanja. Zračenje predaje tvari s kojom se susrelo dio ili ponekad svu svoju energiju te predana energija mijenja svojstva i stanja ozračene tvari, a mijenja se i samo zračenje. Posljedice tog međudjelovanja mogu biti korisne i štetne za živa bića iako se mnogo češće ističu negativni učinci zračenja. [1]

Osnovni podatak o ionizirajućem zračenju pružaju nam elementi koji čine to zračenje. Možemo razlikovati dvije osnovne skupine zračenja, a to su elektromagnetsko i korpuskularno, odnosno čestično zračenje. Elektromagnetsko zračenje nastaje kada elektron koji se nalazi u elektronskom omotaču atoma prelazi s više energijske razine na nižu energijsku razinu, usporavanjem brzih elektrona te u nuklearnim procesima. Korpuskularno ili čestično zračenje nastaje raspadom atomske jezgre ili ubrzanjem čestica u električnom ili promjenjivom magnetskom polju. Karakteriziraju ga osnovna svojstva: brzina, masa, količina gibanja, električni naboj i energija čestice. Podjela zračenja na elektromagnetsko i korpuskularno u mnogim pojavama i nije važna jer elementi mikrosvijeta ovisno o energijskom području imaju dvojno ponašanje, u nekim pojavama pokazuju valna svojstva dok u nekim pokazuju čestična svojstva. [1]

Postoje dvije vrste izvora ionizirajućeg zračenja: prirodni i umjetni izvori. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja su prirodno radioaktivne tvari, nuklearni procesi u zvijezdama od kojih potječe kozmičko zračenje i tvari koje u međudjelovanju s prirodnim zračenjem emitiraju sekundarno zračenje. Na prirodne izvore nije moguće utjecati, oni zrače po zakonima radioaktivnog raspada ili nuklearnih procesa. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja su tvari koje su umjetno načinjene nuklearnim procesima u reaktorima i nuklearnim eksplozijama. U umjetne izvore zračenja spadaju rendgenske zrake u medicini, otpad od testiranja nuklearnog oružja, radioaktivni otpad nuklearne industrije, industrijske  $\gamma$  – zrake te uređaji poput dimnih alarma i slično. Nekim od umjetnih izvora se može upravljati tijekom njihova rada (npr. rendgenski uređaji, akceleratori, nuklearni reaktori), a nekima se nakon pokretanja više ne može upravljati (npr. umjetna radioaktivnost i nuklearne eksplozije) te oni zrače po zakonima radioaktivnog raspada baš kao i prirodni izvori. [10, 11, 12]

### Vrste ionizirajućeg zračenja

Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje obuhvaća rendgensko zračenje i  $\gamma$  – zračenje, dok se korpuskularno zračenje naziva prema česticama  $\alpha$  – zračenje,  $\beta$  – zračenje, neutronske zračenje itd. Na slici 3 nalazi se spektar elektromagnetskog zračenja. [1, 13]



Slika 3. Spektar elektromagnetskog zračenja [13]

## Rendgensko zračenje

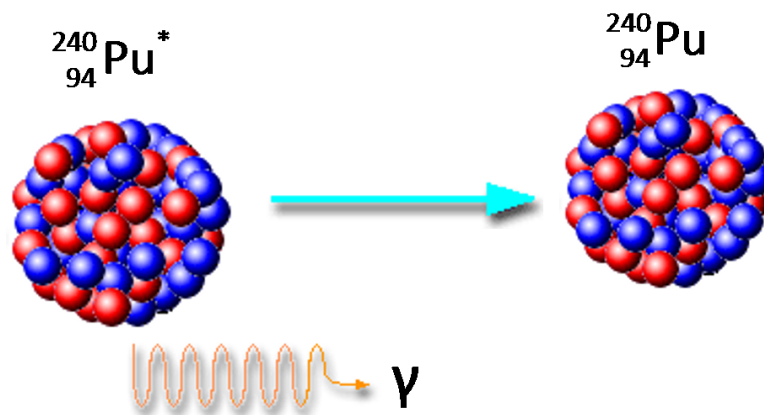
Rendgenske zrake koje su još poznate kao X-zrake otkrio je Wilhelm Conrad Röntgen 1895. godine. Objavio je da je otkrio nevidljive zrake koje izazivaju fluorescenciju, prolaze kroz materiju, te se one ne otklanjaju u magnetskom polju. Röntgen je te zrake nazvao X-zrakama zbog njihove nepoznate prirode. Röntgen je uočio sličnost novootkrivenih zraka s vidljivom svjetlošću. Uočio je veliku prodornost ovih zraka te ih nije mogao sabiti s lećom u žarište, a pokusi s lomom svjetlosti i refrakcijom nisu mu uspijevali. 1912. godine znanstvenik Max von Laue dokazao je da se rendgenske zrake mogu ogibati te je tada postalo jasno da su to transverzalni elektromagnetski valovi kao i vidljiva svjetlost, od koje se razlikuju po mnogo kraćim valnim duljinama. Rendgenske zrake imaju valnu duljinu od 0,01 nm do 10 nm, što približno odgovara području između ultraljubičastog i  $\gamma$  – zračenja (Slika 3). Najpoznatija primjena ovih zraka je u dijagnostičkoj radiografiji i kristalografiji. [7, 13, 14, 15]

Rendgenske zrake dijele se na tvrde i meke rendgenske zrake s obzirom na mogućnost njihova prodiranja kroz razne materijale. Meke rendgenske zrake imaju valne duljine od 0,1 nm do 10 nm, dok tvrde rendgenske zrake imaju valnu duljinu od 0,01 nm do 0,1 nm, što se može vidjeti na slici 3. Osnovna razlika između rendgenskih i  $\gamma$  – zraka je u načinu na koji one nastaju. Rendgenske zrake nastaju u vanjskom omotaču atoma, a  $\gamma$  – zrake nastaju u jezgri atoma. [14]

## $\gamma$ – zračenje (gama – zračenje)

$\gamma$  – zračenje su elektromagnetski valovi vrlo visoke frekvencije i energije, koji nastaju prilikom kvantnih prijelaza nestabilnih atomskih jezgri s pobuđenih stanja, u procesu kočnoga zračenja brzih elektrona prilikom sudara s atomskim jezgrama i u procesima pretvorbi subatomske čestice (Slika 4). Otkrili su ih 1898. godine M. Curie i P. Curie, proučavajući prirodnu radioaktivnost. Energija  $\gamma$  – zračenja je u području od 10 keV do 17,6 MeV, što odgovara valnim duljinama od 1 pm do 1 nm (Slika 3). Pri radioaktivnom raspadanju, nakon  $\alpha$  – ili  $\beta$  – emisije, jezgre često emitiraju  $\gamma$  – zračenje, koje se može znatno razlikovati po energiji. [1, 7, 16]

$\gamma$  – zračenje spada u najprodorniju vrstu ionizirajućeg zračenja, ali im je jačina ionizacije puno manja od  $\alpha$  – čestica i  $\beta$  – čestica. Ustvari,  $\gamma$  – zračenje ionizira plinove indirektno, uslijed toga što duž svoje putanje izbacuju elektrone iz atoma i molekula plinova, pa ovi sekundarni elektroni na svojim kratkim stazama stvaraju ionske parove. Neke  $\gamma$  – zrake mogu proći i kroz olovnu ploču debljine 0,2 m ili čeličnu ploču debljine 0,3 m. [1, 16]



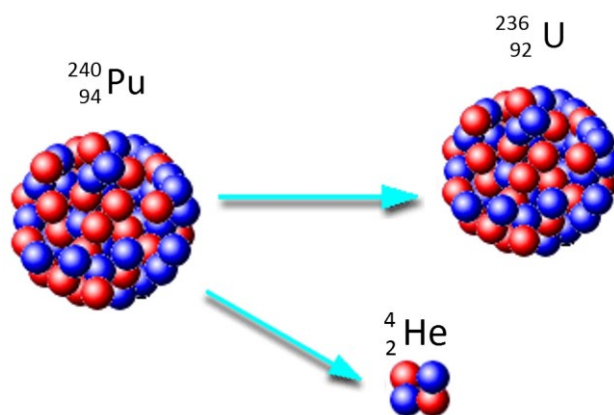
Slika 4.  $\gamma$  – zračenje

Slično kao rendgensko zračenje,  $\gamma$  – zračenje primjenjuje se u industriji (za ispitivanje materijala) i medicini (za liječenje tumora). Zbog baktericidnoga djelovanja služi i za sterilizaciju prostora i medicinske aparature, primjenjuje se i za izazivanje genetskih mutacija kod biljaka i mikroorganizama te za proizvodnju antibiotika. [16, 17]



## $\alpha$ – zračenje (alfa – zračenje)

$\alpha$  – zračenje je čestično ionizirajuće zračenje koje se sastoji od roja brzih  $\alpha$  – čestica izbačenih iz teških atomskih jezgara radioaktivnim  $\alpha$  – raspadima.  $\alpha$  – čestica je čestica koja se sastoji od dva protona i dva neutrona, kao što možemo vidjeti na slici 5.  $\alpha$  – čestica se od jezgre helija razlikuje samo po tome što ima puno veću brzinu gibanja. Kinetička energija, a time i brzina gibanja  $\alpha$  – čestica ovisi o atomskoj jezgri iz koje je emitirana. Struja  $\alpha$  – čestica vrlo brzo gubi kinetičku energiju zbog jakog ionizirajućeg djelovanja i ne prodire duboko u tvar.  $\alpha$  – česticu može zaustaviti i običan list papira ili koža. Iako  $\alpha$  – čestice nemaju velik doseg, ako se njihov izvor unese u tijelo bilo hranom ili udisanjem mogu biti izuzetno opasne. [1, 7, 18, 19]



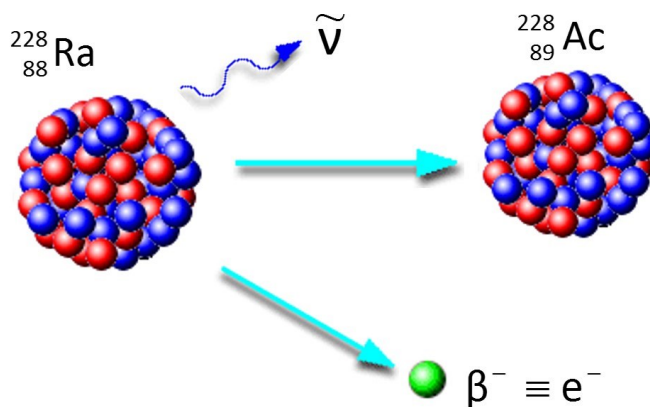
Slika 5.  $\alpha$  – raspad

$\alpha$  – raspad se događa najčešće kod masivnih jezgri koje imaju prevelik omjer protona u odnosu na neutrone.  $\alpha$  – čestica s dva protona i dva neutrona je vrlo stabilna konfiguracija nukleona. Mnoge se jezgre masivnije od olova raspadaju upravo  $\alpha$  – raspadom. [19]

## $\beta$ – zračenje (beta – zračenje)

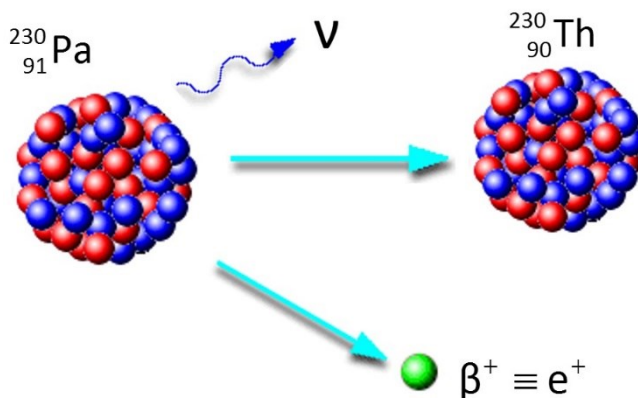
$\beta$  – raspad je vrsta radioaktivnog raspada izazvana utjecajem slabe nuklearne sile, pri kojem atomska jezgra zrači elektron ili pozitron, i ne dolazi do promjene atomske mase, već se samo atomski broj poveća ili smanji za jedan, a to znači da atomska jezgra se pretvori u novi kemijski element, koji je sljedeći ili prethodni redni broj u periodnom sustavu elemenata (Slika 6). Nestabilne atomske jezgre koje imaju višak neutrona mogu spontano ostvariti  $\beta^-$  – raspad, gdje se neutron raspada u proton, uz zračenje elektrona i antineutrina.  $\beta^-$  – raspad nastaje zbog djelovanja

slabe nuklearne sile. Taj postupak se obično javlja u nuklearnim reaktorima, ako u nuklearnom gorivu ima nestabilnih atomskih jezgara s viškom neutrona. [1, 7, 19, 20]



Slika 6.  $\beta^-$  – raspad

Nestabilne atomske jezgre koje imaju višak protona mogu spontano ostvariti  $\beta^+$  – raspad, gdje se proton raspada u neutron, uz zračenje pozitrona i neutrina (Slika 7). Pozitron je antičestica elektrona koja ima jednaku masu i spin kao elektron, ali suprotni električni naboj.  $\beta^+$  – raspad se može dogoditi samo unutar atomske jezgre, kojoj je nuklearna energija vezanja novonastalog kemijskog elementa ili izotopa veća od nuklearne energije vezanja kemijskog elementa iz kojeg je radioaktivni raspad započeo. [7, 19]

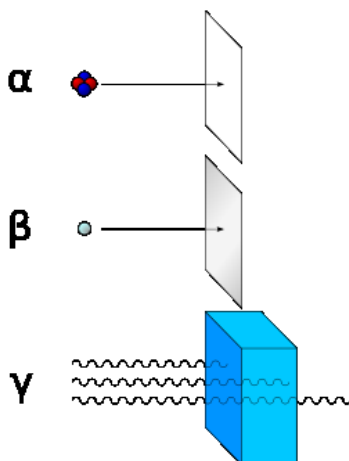


Slika 7.  $\beta^+$  – raspad

$\beta$  – raspad se može koristiti za liječenje očiju i raka kostiju. U ispitivanju materijala koriste se i za mjerenje debljine tankih materijala, kao što je papir.  $\beta$  – čestice se koriste i za stvaranje beta

svjetlosti, koja nastaje ozračivanjem tricija i fluorescentne tvari.  $\beta^+$  – raspad se koristi u tomografiji pozitronskim zračenjem. [1]

Istraživanja su pokazala da  $\beta$  – čestice imaju puno manju sposobnost ionizacije plinova od  $\alpha$  – čestica, ali su im dometi puno veći, i do nekoliko metara.  $\beta$  – čestice mogu prodrijeti kroz aluminijski lim debljine 1 mm, ali ih olovni lim debljine 3 mm apsorbira (Slika 8). Kod prolaza  $\beta$  – čestica kroz neku tvar može nastati i zakočno rendgensko zračenje. [7]



Slika 8. Prolazak  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  – zračenja kroz različite materijale [7]

## Neutronska zračenje

Neutronska zračenje je roj brzih neutrona. Neutroni su s protonima glavni sastojci atomske jezgre. Kada se neutron nalazi izvan jezgre on je nestabilan. Nakon nekog vremena on se raspada na tri elementarne čestice: proton, elektron i antineutrino. Na neutron ne djeluju električna i magnetska polja tako da nema međudjelovanja neutrona i elektrona u atomskom omotaču ni električnog djelovanja neutrona i jezgre. Zbog toga neutron vrlo lako prodire do atomske jezgre i tada na njega djeluju nuklearne sile. [1, 7, 21]

Neutronska zračenje posljedica je nuklearnih procesa. Neutronska zračenje je komponenta kozmičkog zračenja i zračenja iz nestabilnih teških jezgara. Vrlo snažno neutronska zračenje nastaje u nuklearnim reaktorima. [1]

## Uređaji za zapažanje i mjerenje ionizirajućeg zračenja

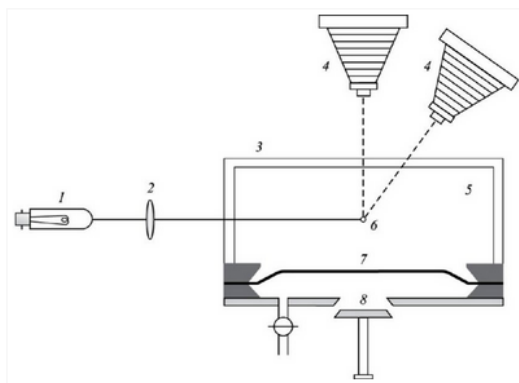
Detektori zračenja su najjednostavniji uređaji pomoću kojih se samo zapaža zračenje. Ukoliko takvim uređajem možemo zapažati pojedine čestice ili fotone te ih možemo brojati, taj uređaj postaje mjerni instrument, odnosno brojač. Mjerni instrumenti primjenjuju kvantitativno poznat odnos između nekog svojstva zračenja koje se mjeri i pojave koju je zračenje izazvalo. Postoje mnogi uređaji koji su napravljeni za zapažanje i mjerenje zračenja, a može ih se razvrstati u tri osnovne skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Osim ovih uređaja, postoje i razni uređaji posebnih namjena, npr. za razlučivanje pojedinih vrsta zračenja po energijama, masama čestica (analizatori, spektrometri), za promatranje slike prozračenih predmeta (fluorescentni zastori i elektronički pretvornici). [1]

Vizualizatori tragova su uređaji pomoću kojih se na temelju nekog međudjelovanja mogu privremeno ili trajno vidjeti tragovi čestica ili fotona u tvari. Primjeri takvih uređaja su radiografski sloj i Wilsonova maglena komora. Ovi uređaji su se ranije često primjenjivali u znanstvenim istraživanjima, gdje se promatranjem i mjerenjem tragova čestica i fotona mogu saznati mnoga njihova svojstva. Brojači, koje još nazivamo i detektorima, su uređaji pomoću kojih se registriraju i broje pojedine naelektrizirane čestice i fotoni. Takvi su uređaji Geiger – Müllerov brojač, scintilacijski brojač, poluvodički brojač te mnogi suvremeni brojači. Dozimetri su uređaji pomoću kojih se mjeri doza koju je zračenje predalo nekoj tvari. Takvim uređajima pripada radiografski sloj kod kojega se mjeri zacrnjenje koje je uzrokovalo zračenje, ionizacijske komore, luminiscentni slojevi te kemijski dozimetri. [1, 22]

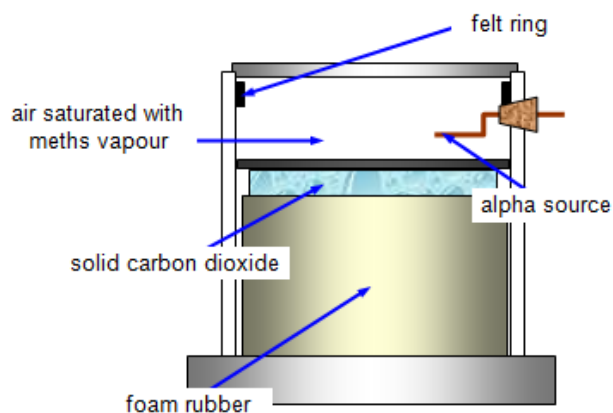
Druga podjela detektora bila bi u dvije kategorije prema rezultatima koje daju. Prva kategorija detektora kao rezultat daje sliku staze opisane gibanjem nabijene čestice. Proučavanjem slike moguće je odrediti naboj, brzinu i vrstu čestica, njen raspad ili raspršenje, određivanje vremena života i mnoge druge podatke. U ovu kategoriju spadaju Wilsonova maglena komora, difuzijska maglena komora, komora na iskre, komora na mjehuriće te Čerenkovljev brojač. Detektori koji spadaju u drugu kategoriju bilježe prisustvo zračenja, vrstu zračenja te energiju zračenja. U ovu kategoriju spadaju plinski, scintilacijski i poluvodički detektori. [22]

## Wilsonova maglena komora i difuzijska komora

Wilsonova maglena komora naziva se još i maglena komora, pripada detektorima prve kategorije te radi na istom principu kao i difuzijska komora. Nju je 1911. godine konstruirao britanski fizičar i meteorolog Charles Wilson, a za to je otkriće 1927. godine dobio Nobelovu nagradu. Maglena i difuzijska komora ne moraju nužno biti velikih dimenzija te je zbog toga praktična i jednostavna za uporabu. Unutar komore se nalazi prezasićena vodena para, odnosno para alkohola. Da bi se ta para mogla kondenzirati potrebna su središta kondenzacije. Prolaskom zračenja kroz paru dolazi do pojave ionizacije molekula zraka odnosno alkohola, a onda ti ioni postaju centri kondenzacije. Naglim pomicanje klipa prema dolje, nezasićena para u komori postaje zasićenom, jer dolazi do naglog hlađenja pare te se kondenzacija u obliku niza malih kapljica događa oko iona koje je načinilo zračenje. Na taj način ionizirajuće zračenje postaje vidljivo. Fotografiranjem možemo sačuvati podatke o putanji čestice te kasnijim proučavanjem možemo odrediti mnoge karakteristike čestice. Razlika između Wilsonove i difuzijske maglene komore je u metodi stvaranja magle. Wilsonova maglena (Slika 9) komora stvara maglu brzim pomicanjem dijafragme, zbog kojeg dolazi do ekspanzije zasićene pare. Difuzijska komora nema pokretnih dijelova i njezin rad je kontinuiran. Unutar komore se nalazi filc natopljen alkoholom i izvor  $\alpha$  – zračenja. Isparavanjem alkohola zrak postaje zasićen parama alkohola. Ispod komore se nalazi spremište sa suhim ledom, kako možemo vidjeti na slici 10. Na slici 11 možemo vidjeti kako izgleda prikaz putanje čestica pomoću maglene komore. [22, 23, 24]



Slika 9. Wilsonova maglena komora – 1. bljeskalica, 2. leća, 3. stakleno kućište, 4. fotoaparati, 5. prostor komore, 6. kondenzacijska jezgra, 7. pokretna membrana, 8. klip [23]



Slika 10. Difuzijska maglena komora [22]



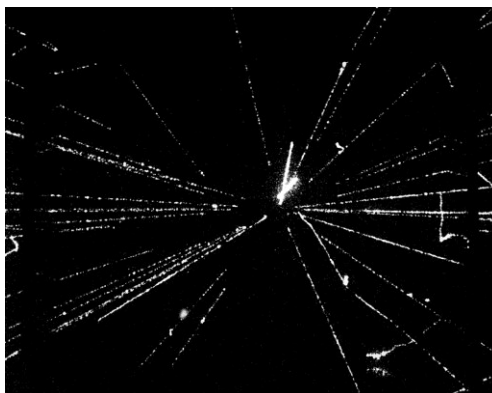
Slika 11. Prikaz putanje čestica pomoću maglene komore [22]

## Komora na iskre

Komora na iskre spada u detektore prve kategorije. Sastoji se od niza paralelnih i vrlo tankih elektroda u hermetički zatvorenoj kutiji koja je ispunjena plinom (helij, neon ili njihova smjesa). Njen izgled možemo vidjeti na slici 12. Između tih elektroda vlada visoki napon, no taj napon nije dovoljno visok da bi se dogodio električni izboj među njima. Za detekciju čestice potreban je i scintilacijski detektor, koji spada u vrstu detektora druge kategorije. Visoki napon se uključuje onog trena kada scintilacijski detektori smješteni na periferiji komore registriraju prolaz ionizacijske čestice. Ioni koji nastanu prolaskom nabijene čestice omogućuju izboj koji se očituje nizom iskri duž putanje čestice te na taj način možemo registrirati stazu čestice. Kako to izgleda možemo vidjeti na slici 13. [22, 24]



Slika 12. Komora na iskre [24]

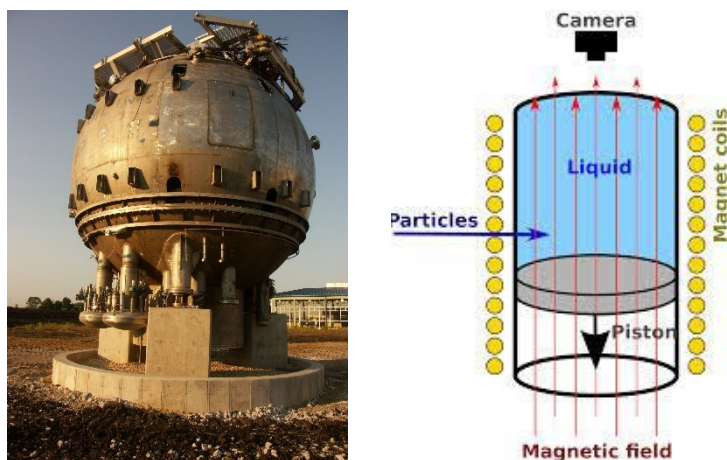


Slika 13. Sudar proton – antiproton snimljen s komorom na iskre u CERN-u

### Komora na mjehuriće

Komora na mjehuriće ili mjehurićasta komora je detektor prve kategorije u kojemu je medij bezbojna pregrijana tekućina, a to može biti tekući eter, tekući vodik, dušik, izopentan ili neka druga tekućina. Komora se nalazi u magnetskom polju, a klipom se regulira volumen tekućine. Na gornjem dijelu posude postavljena je kamera koja slika trag čestica, kao što možemo vidjeti na slici 14. Kada kroz pregrijanu tekućinu prođe neka ionizirajuća čestica, tada stvoreni ioni postaju jezgre za stvaranje mjehurića pare u pregrijanoj tekućini. Ti mjehurići pokazuju putanju zračenja pod jakim osvjetljenjem te uočavamo neprekinute bijele linije koje čine sitni mjehurići (Slika 15). Komoru na mjehuriće izumio je Donald A. Glaser 1952. godine, a za svoj izum je dobio Nobelovu

nagradu 1960. godine. Nakon izuma ove komore, Wilsonova i difuzijska komora su se počele manje primjenjivati, ali nisu izgubile na važnosti. [22, 24, 25]



Slika 14. Komora na mjehuriće



Slika 15. Prikaz putanje čestica pomoću komore na mjehuriće [22]

## Čerenkovljev brojač

Čerenkovljevo zračenje je elektromagnetsko zračenje koje nastaje prolaskom nabijene čestice kroz medij, pri čemu je brzina čestice veća od brzine svjetlosti u tome mediju. Iz smjera elektromagnetskog zračenja koje je emitirano može se odrediti brzina čestice. Ovu pojavu je uočio i opisao Pavel A. Čerenkov, a objasnili su je I. M. Frank i I. J. Tamm, a za to su dobili Nobelovu nagradu 1958. godine. Čerenkovljev detektor je unaprijeđen i danas se koristi u mnogim istraživanjima. [22, 26, 27]



## Scintilacijski detektor

Scintilacijski detektor spada u drugu kategoriju detektora koji bilježe zračenje i vrstu zračenja. Prvi scintilacijski detektor koji se koristio bio je zastor prekriven slojem cinkova sulfida, a imao je vrlo široku primjenu. Današnji scintilacijski detektori su standardni detektori  $\gamma$  – zračenja. Većina tog zračenja bi kroz plin prošla bez ikakve interakcije te su scintilatori obično čvrsta tijela, iako mogu biti i gusti plinovi i tekućine, koji proizvode svjetlost pri međudjelovanju sa zračenjem. Svjetlost se pretvara u električni signal koji se dalje obrađuje elektronski i računalom. Scintilacijski detektor se sastoji od tijela scintilatora, scintilacijskog kristala i fotomultiplikatora (Slika 16). [22, 28]



Slika 16. Scintilacijski kristal okružen raznim scintilacijskim uređajima

## Poluvodički detektori

Poluvodički detektori također spadaju u drugu kategoriju detektora. Oni su bazirani na kristalu poluvodiča, najčešće silicija i germanija (Slika 17). Prolazak zračenja kroz poluvodički materijal dovodi do stvaranja parova elektron – pozitron, koji se zatim usmjeravaju pomoću električnog polja. Poluvodički detektori se primjenjuju od sredine 20. stoljeća i najbolji su detektori  $\gamma$  – zračenja i u ovom slučaju je germanijski detektor pogodniji od silicijskog. Postoje čisti ili intrinzični poluvodiči, koji se sastoje samo od istovrsnih atoma te primjesni ili ekstrinzični poluvodiči, koji nastaju dodavanjem primjesa zbog promjene električnih svojstava. Ovisno o

dodanoj primjesi nositelji naboja mogu biti elektroni i šupljine. Poluvodiče u kojima su elektroni većinski nositelji naboja nazivamo poluvodiči n-tipa, a poluvodiče u kojima su šupljine većinski nositelji naboja nazivamo poluvodiči p-tipa. [1, 22, 29, 30, 31]



Slika 17. Silicijski i germanijski detektori [31]

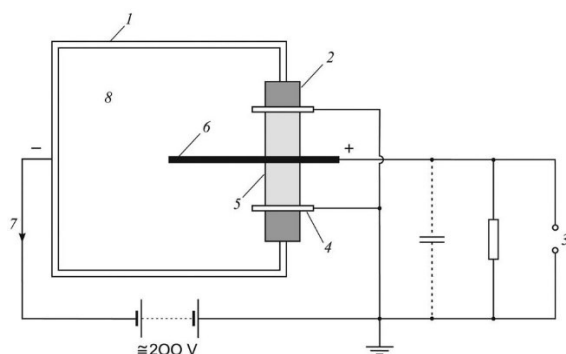
Ovi detektori moraju imati i odgovarajući sustav za hlađenje. S obzirom da su poluvodiči kristalni materijali zračenje ih može oštetiti, što onda ograničava njihovu dugotrajnu uporabu. [22]

## Plinski detektori

Princip rada plinskih brojača temelji se na sakupljanju elektrona i iona stvorenih ionizacijskim zračenjem na elektrode unutar tijela brojača. Razlikujemo tri osnovna tipa plinskih brojača: ionizacijska komora, proporcionalni brojač i Geiger – Müllerov brojač. Iznos napona između katode i anode je vrlo važan jer određuje o kojem tipu brojača se radi. [22]

Ionizacijska komora spada u drugu kategoriju detektora i ima relativno mali napon među elektrodama. Rad ionizacijske komore se zasniva na sakupljanju ionskih parova koji nastaju u plinu, a do tog sakupljanja dolazi zbog djelovanja električnog polja komore. Ionizacijska komora se uglavnom sastoji od metalne cilindrične posude i dvije elektrode, što možemo vidjeti na slici 18. Unutrašnjost te posude ispunjena je plinom čiji je tlak točno utvrđen te je niži od atmosferskog tlaka. Prolaskom zračenja kroz komoru dolazi do ioniziranja molekula plina te se stvaraju ionski parovi, pozitivni ioni i slobodni elektroni. Pod utjecajem električnog polja pozitivni ioni putuju

prema negativnoj elektrodi, katodi, a elektroni prema pozitivnoj elektrodi, anodi. Napon između elektroda mora biti dovoljno velik da razdvoji elektrone i pozitivno nabijene ione da bi oni dospjeli do elektrode, ali istovremeno mora biti dovoljno mali da ne ubrza elektrone do te mjere da na putu do anode mogu ponovno ionizirati atome plina. Mjerenjem tako dobivene struje određuje se energija ionizirajućeg zračenja. [1, 22, 32]



Slika 18. Ionizacijska komora – 1. katoda, 2. vanjski izolator, 3. izlaz u pojačalo, 4. zaštitni prsten, 5. unutrašnji izolator, 6. anoda, 7. struja, 8. plin [32]

Ionizacijska komora se kasnije unaprjeđuje i nastaje proporcionalni brojač, a njegov princip rada je malo napredniji. Proporcionalni brojač ima anodu u obliku tanke žice, čime se postiže dovoljno jako polje u okolini anode da se izazove multiplikacija – umnožavanje broja ionskih parova, tako da se dobiju viši naponski pulsovi uz zadržavanje proporcionalnosti s brojem primarno stvorenih ionskih parova, a tako i informacije o energiji ionizirajućeg zračenja. [22, 33]

## Geiger – Müllerov brojač

Uređaj koji se danas najčešće upotrebljava za mjerenje ionizirajućeg zračenja poznat je pod imenom Geiger – Müllerov brojač, često se skrati samo na Geigerov brojač ili G-M brojač. Iz razloga što dio ovog uređaja najčešće ima oblik cijevi možemo još susresti nazive kao što su Geiger – Müllerova cijev ili G-M cijev. Geiger – Müllerov brojač spada u drugu kategoriju detektora. [1]

## Povijest Geiger – Müllerova brojača

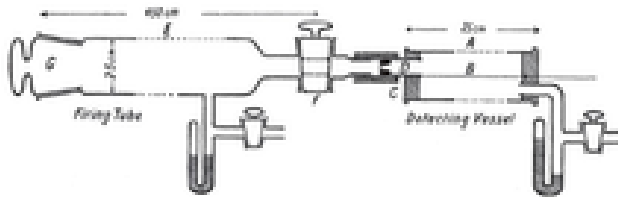
Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (Slika 19) rođen je 30. rujna 1882. godine, a preminuo je 24. rujna 1945. godine. Bio je njemački fizičar. Poznat je kao jedan od izumitelja Geiger – Müllerova brojača i po Rutherfordovom pokusu s  $\alpha$  – česticama i zlatnim listićima u kojem je sudjelovao.

Hans Geiger je rođen kao jedno od petero djece. Otac mu je bio profesor indologije na sveučilištu u Erlangenu. 1902. godine Geiger je započeo studij fizike i matematike na sveučilištu u Erlangenu, a doktorirao je 1906. godine. [34]



Slika 19. Johannes (Hans) Wilhelm Geiger [34]

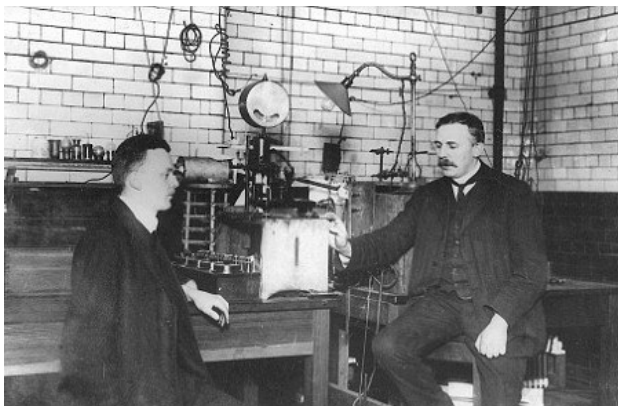
1907. godine Geiger počinje raditi s Ernestom Rutherfordom na Sveučilištu u Manchesteru. Rutherford i Geiger zajedno proučavaju  $\alpha$  – čestice. Budući da su znali da  $\alpha$  – čestice mogu proći kroz tanke krute tvari, Rutherford i Geiger pretpostavljaju da bi one mogle prolaziti i ravno kroz atom. Geiger dizajnira uređaj (Slika 20) koji su koristili za snimanje prolazaka  $\alpha$  – čestice kroz zlatnu foliju gdje su se na ekranu uređaja mogle promatrati scintilacije ili sitni bljeskovi svjetlosti. Ručno brojanje na tisuće bljeskova bio je vrlo težak zadatak, gotovo nemoguć. Navodno je Geiger bio radoholičar koji je znao sate i sate provoditi brojeći bljeskove.[34, 35]



Slika 20. Geigerov prvobitni brojač  $\alpha$  – čestica

Geiger je dobio zadatak osmisлити precizniji način brojanja bljeskova. Njegovo rješenje je bila primitivna verzija Geigerova brojača. Ovaj prototip je u biti bio vrlo osjetljiv električni uređaj namijenjen za brojanje emisije  $\alpha$  – čestica. Sastojao se od fine tanke žice nabijene visokim naponom koja je prolazila središtem valjka iz kojega je gotovo bio isisan zrak. Kada su  $\alpha$  – čestice prolazile razrijeđenim plinom uzrokovale su nabijanje čestica plina, proces koji se naziva ionizacija. Slijedilo je kratkotrajno opadanje električnog napona, a impuls struje pobuđen svakom pojedinom  $\alpha$  – česticom mogao se opaziti na brojčaniku. [34]

Ovo je bio rad koji je doveo do Rutherfordove nuklearne teorije atoma za koju je 1908. godine osvojio Nobelovu nagradu za kemiju. Geiger i Rutherford su koristili brojač i druge detektore zračenja u eksperimentima koji su doveli do identifikacije  $\alpha$  – čestice kao jezgre atoma helija i do Rutherfordove ispravne pretpostavke da u svakom atomu jezgra zauzima vrlo mali volumen u samom središtu. [34]



Slika 21. Hans Geiger (lijevo) i Ernest Rutherford (desno) 1913. godine

Geiger je ostao u Engleskoj sve do 1912. godine, kada je imenovan voditeljem njemačkog Nacionalnog instituta za znanost i tehnologiju u Berlinu, gdje je nastavio svoje studije o atomskoj strukturi i zračenju. 1913. godine Geigeru su se pridružila dva nuklearna fizičara, Walter Bothe

koji je kasnije osvojio Nobelovu nagradu u području fizike i James Chadwick, osvajač Nobelove nagrade za fiziku 1935. godine. Obojica su se bavila proučavanjem  $\alpha$  – čestica, a Chadwick se bavio i proučavanjem  $\beta$  – čestica. Njihov rad je prekinut 1914. godine, početkom Prvog svjetskog rata. Geiger je tada služio u njemačkoj vojsci. [34, 35]

Nakon što je rat završio, Geiger se nastavio baviti svojim radom, a 1924. godine je iskoristio svoj uređaj za potvrdu Comptonovog efekta. Godine 1925. Geiger je prihvatio svoj prvi posao predavača koji je bio na Sveučilištu u Kielu u Njemačkoj. Ovdje je započeo svoju suradnju s Waltherom Müllerom. Oni su poboljšali osjetljivost i izdržljivost brojača, te je on postao poznat kao Geiger – Müllerov brojač. Ovaj brojač nije detektirao samo  $\alpha$  – čestice već je mogao detektirati i  $\beta$  – čestice i ionizirane fotone. Brojač je izgledom bio vrlo sličan današnjem brojaču što vidimo na slici 22. [34]



Slika 22. Rana verzija Geiger – Müllerova brojača napravljena 1932. godine za korištenje u laboratoriju [42]

Godine 1929. Geiger je prešao na Sveučilište u Tübingenu, također u Njemačkoj, gdje je imenovan profesorom fizike i direktorom istraživanja na Institutu za fiziku. 1929. godine na Institutu Geiger je napravio svoje prvo promatranje kozmičkih zraka. Nakon toga je nastavio istraživati kozmičke zrake, umjetnu radioaktivnost te nuklearnu fisiju nakon što je 1936. prihvatio poziciju na Technische Hochschule u Berlinu, na tom položaju je ostao sve do smrti. Tijekom Drugog svjetskog rata, Geiger je kratko sudjelovao u njemačkom pokušaju da naprave atomsku bombu. U lipnju 1945. godine Geiger je pobjegao iz Berlina u Potsdam gdje je umro tri mjeseca kasnije u dobi od 62 godine. [34, 35]

Walther Müller (Slika 23) rođen je u Njemačkoj 1905. godine, a umro je u SAD-u 1979. godine. Bio je njemački fizičar čiji je najznačajniji doprinos u poboljšanju Geigerova brojača, te zajedničkoj konstrukciji Geiger – Müllerove cijevi. [36]



Slika 23. Walther Müller [36]

Na Sveučilištu u Kielu Müller je studirao fiziku, kemiju i filozofiju. 1925. godine postaje prvi student doktorskih studija pod mentorstvom Hansa Geigera koji je ondje počeo predavati. Njihov rad na području ionizacije plinova doveo je do unaprjeđenja Geigerova brojača. [36]

Müller je neko vrijeme predavao na Sveučilištu u Tübingenu dok je ostatak znanstvene karijere u domovini radio kao industrijski fizičar. Nakon završetka Drugog svjetskog rata u zemlji postaje zabranjeno istraživanje nuklearne fizike zbog čega postaje savjetnik u istraživačkim laboratorijima u australskom Melbourneu. Nakon toga se seli u SAD gdje ponovno radi u industrijskoj fizici te osniva vlastitu tvrtku koja se bavi proizvodnjom Geiger – Müllerove cijevi. [36]

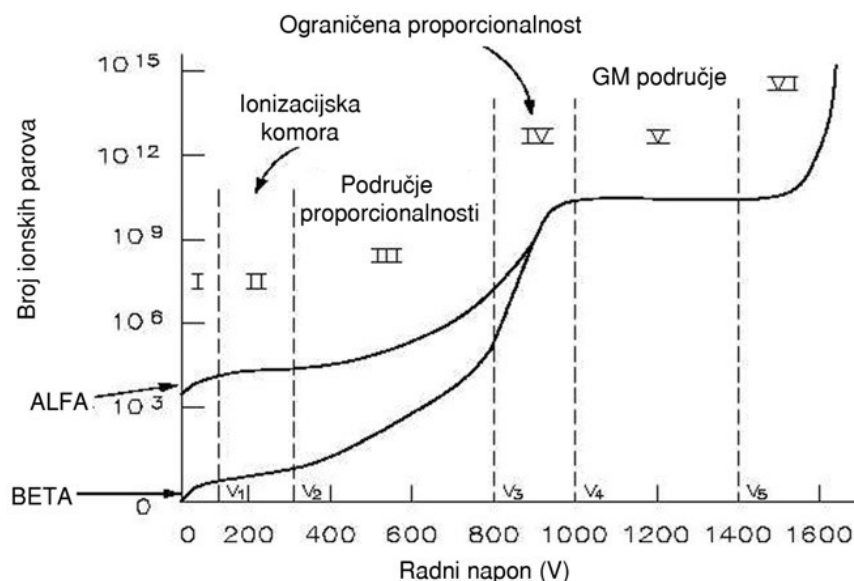
### Područje rada Geiger – Müllerova brojača

Ranije je spomenuto da postoje tri vrste plinskih brojača te da je Geiger – Müllerov brojač jedan od njih. Označimo li s  $n$  broj iona koji stignu na kolektor, elektrodu koja služi za odvođenje električnog naboja, a s  $n_0$  broj primarno stvorenih ionskih parova, onda je omjer  $\frac{n}{n_0}$  bitan za razlikovanje pojedinih tipova brojača. Kod niskih napona brojača može se dogoditi da je omjer  $\frac{n}{n_0}$  manji od jedan, a to znači da se dio iona na putu prema elektrodama rekombinirao. Ako je napon

dovoljan da svi primarno nastali ioni dođu do elektroda onda je omjer  $\frac{n}{n_0}$  jednak jedan. U tom slučaju radi se o ionizacijskoj komori. [37]

Raste li napon između elektroda kod neke će vrijednosti napona primarno stvoreni elektroni na svom putu prema kolektoru dobiti dovoljnu energiju da prouzroče sekundarnu ionizaciju. Omjer  $m = \frac{n}{n_0}$  naziva se faktor pojačanja i on je veći od jedan. Faktor pojačanja ovisi o danom naponu i raste kada napon raste. U ovom slučaju radi se o proporcionalnom brojaču. Kod proporcionalnog brojača bitno je da postoji proporcionalnost između veličina  $n$  i  $n_0$ . [37]

Ako napon između elektroda prijeđe neku određenu vrijednost onda  $n$  postaje neovisan o  $n_0$  uz uvjet da je  $n_0 > 1$ . Sada smo došli do područja Geiger – Müllerovala brojača. U području napona koji odgovara Geiger – Müllerovalom brojaču ne možemo ništa zaključiti o veličini primarne ionizacije, nego samo da je do primarne ionizacije došlo. Na slici 24 možemo uočiti da u Geiger – Müllerovalom području nema razlike između signala od  $\alpha$  – čestice i  $\beta$  – čestice. [37]



Slika 24. Područje rada plinskih brojača

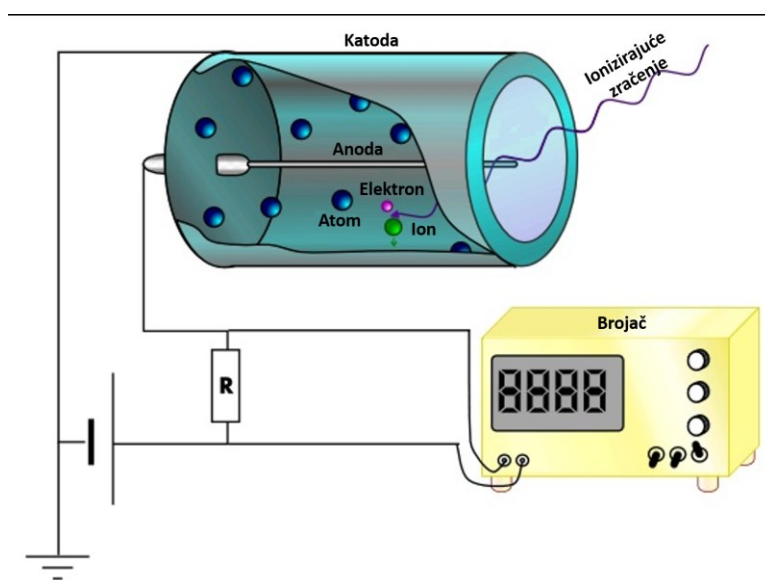
Ukoliko bi se napon i dalje povećavao dolazi do samostalnog izbijanja u brojaču, koje ne ovisi o ionizaciji uzrokovanoj radioaktivnim zračenjem, zbog čega nam brojač kod takvog napona ne može dati nikakav koristan podatak. Kažemo da je došlo do proboja brojača. [37]



## Princip rada Geiger – Müllerova brojača

Geiger - Müllerov brojač se sastoji od Geiger – Müllerove cijevi, osjetljivog elementa koji detektira zračenje i elektronike za obradu. Presjek Geiger – Müllerova brojača vidimo na slici 25.

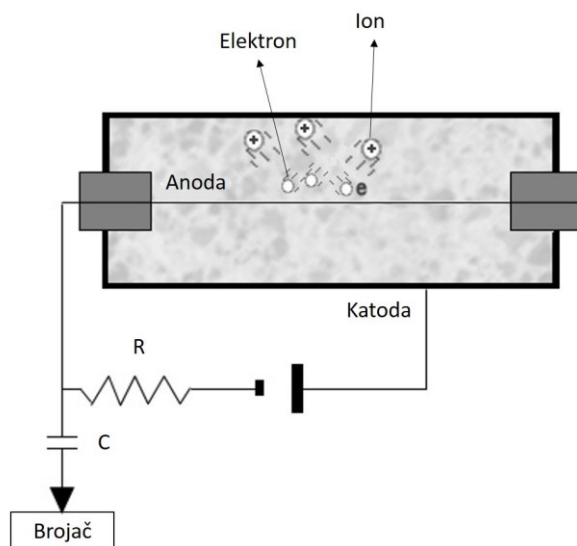
Geiger – Müllerova cijev se sastoji od komore koja je ispunjena inertnim plinom, najčešće helijem, neonom ili argonom koji se nalazi na niskom tlaku, otprilike 0,1 atmosferskog tlaka iako se nekada može nalaziti i na tlaku koji je približno jednak atmosferskom. Komora sadržava dvije elektrode, između kojih se nalazi razlika potencijala od nekoliko stotina volti, najčešće 400 do 600 V. Stjenke cijevi su najčešće izrađene od metala ili stakla pa je njihova unutrašnja površina obložena slojem metala, odnosno slojem nekog vodiča kako bismo dobili katodu, dok je anoda žica koja prolazi kroz središte komore. Centralna žica izrađuje se od volframa i ima debljinu od 0,02 do 0,05 mm. Materijal na otvoru cijevi bi trebao imati malu gustoću od  $1,5 \text{ mg/cm}^3$  do  $2,0 \text{ mg/cm}^3$  da bi  $\alpha$  – čestice mogle proći kroz njega. [37, 38, 39, 40, 41]



Slika 25. Presjek Geiger – Müllerova brojača

Kada ionizirajuće zračenje pogodi cijev, neke molekule plina se ioniziraju izravno dok se neke ioniziraju indirektno pomoću sekundarnih elektrona koji su proizvedeni u stjenkama cijevi. To stvara pozitivno nabijene ione i elektrone u plinu, poznate kao ionske parove. Jako električno polje koje stvaraju elektrode u cijevi ubrzava pozitivne ione prema katodi, a elektrone prema anodi. U

neposrednoj blizini anode elektroni imaju dovoljno energije za sekundarnu ionizaciju. Ta se ionizacija širi na obje strane duž anode i nastaje elektronska lavina, koja stvara jedan oblak naboja oko anode. Elektroni su vrlo pokretljivi te će brzo stići na anodu, dok su pozitivni ioni spori i relativno se dugo zadržavaju u blizini anode i smanjuju jakost električnog polja u blizini anode. Ukoliko se dogodi samo jedna lavina po ionizaciji tada će broj pobuđenih molekula biti reda veličine  $10^6$  do  $10^8$ . Ako pak dođe do višestrukih lavina tada će biti  $10^9$  do  $10^{10}$  ionskih parova. Brzina širenja lavine je obično 2 – 4 cm po mikrosekundi tako da potpuna ionizacija plina oko anode za cijevi uobičajene veličine traje svega nekoliko mikrosekundi. Time se kratko zatvara strujni krug i na otporniku (Slika 26, oznaka R) u vanjskom dijelu kruga nastaje naponski impuls. Naponski impuls dolazi na kondenzator (Slika 26, oznaka C) te je on neovisan o vrsti i energiji zračenja. Nakon toga impuls dolazi do električnog brojila (Slika 26, brojač) koji ga registrira te nam ispisuje podatak na svome ekranu. Ta električna brojila često imaju mali zvučnik za zvučnu indikaciju zračenja. [37, 38, 39, 40, 41]



Slika 26. Shematski prikaz Geiger – Müllerova brojača

Postoji opasnost da ioni koji stignu na katodu iz nje izbiju elektrone, koji bi onda krenuli prema anodi i time bi se jednom započeti proces ionizacije neprestano obnavljao. To se sprječava dodavanjem nekih primjesa osnovnom plinu u Geiger – Müllerovoj cijevi, najčešće metilni alkohol ili halogenidi. [39, 41]

## Vrste Geiger – Müllerove cijevi prema primjeni

Postoje dvije osnovne vrste Geiger – Müllerove cijevi: cijev s otvorom na kraju (Slika 27.) i cijev bez otvora na kraju. [42]



Slika 27. Geiger – Müllerova cijev s otvorom na jednom kraju [42]

Cijev s otvorom na jednom svom kraju koristi se za detekciju  $\alpha$  – čestica, niskoenergetskih  $\beta$  – čestica i niskoenergetskih rendgenskih zraka. Ova vrsta cijevi ima cilindričan oblik te na jednom svom kraju ima otvor koji je prekriven tankim slojem materijala kroz koji niskoprodorno zračenje lako prolazi. Liskun je uobičajen materijal koji se koristi u ovom slučaju zbog svoje male mase po jedinici površine. Na drugom kraju cijevi se nalazi električni spoj s anodom. [39]

*Pancake* cijev (Slika 28.) je jedna od varijanti cijevi s otvorom na kraju, cijev ima pljosnat oblik pa od toga dolazi njen naziv, dizajnirana je za detekciju  $\beta$  i  $\gamma$  – čestica. U ovom slučaju anoda je u koncentričnim krugovima tako da se u potpunosti proteže u cijelom prostoru plina. [39, 40]



Slika 28. *Pancake* cijev [42]

Cijev bez otvora na kraju se razlikuje od prethodne po tome što nema otvora. Postoje dvije glavne podvrste ove cijevi koje koriste različite mehanizme kako bi dobile rezultat na brojaču; cijev s debelim stjenkama i cijev s tankim stjenkama. [39]

Cijev s debelim stjenkama se koristi za detekciju  $\gamma$  – čestica. Ova vrsta obično ima debljinu stijenke od 1 do 2 mm i izrađena je od kromiranog čelika. Zbog toga što većina  $\gamma$  – čestica prolazi kroz plin male gustoće bez interakcije, cijev koristi interakciju fotona s molekulama na stjenkama da proizvede visokoenergetske sekundarne elektrone unutar stjenki cijevi. Kako su neki od tih elektrona proizvedeni dovoljno blizu unutarnje stijenke cijevi oni odlaze u plin unutar cijevi. Čim se to dogodi elektron odlazi na anodu i javlja se elektronska lavina kao da je slobodni elektron stvoren u plinu. Lavina nije direktna posljedica djelovanja zračenja na sam plin već sekundarna pojava koja počinje na stjenkama cijevi. [39, 40]

Cijev s tankim stjenkama koristi se za detekciju visokoenergetskih  $\beta$  – čestica.  $\beta$  – čestice ulaze u cijev kroz stijenke te direktno reagira s plinom unutar cijevi. Zračenje mora imati dovoljno energije da prođe kroz stijenke cijevi. Ova vrsta cijevi se također koristi i za detekciju niskoenergetskih  $\gamma$  – zraka i rendgenskog zračenja. [39, 40]

## Uređaj za očitavanje

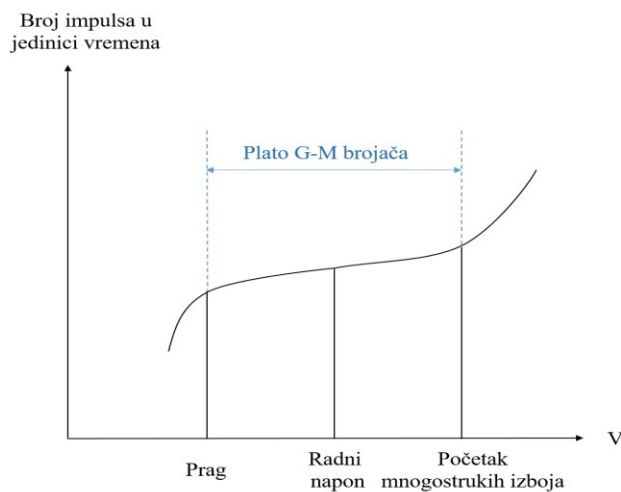
Postoje dvije vrste uređaja za očitavanje; onaj koji pokazuje broj registriranih impulsa i onaj koji pokazuje dozu zračenja. Onaj koji pokazuje broj registriranih impulsa, odnosno brojač je najjednostavniji i ispisuje broj ionizirajućih događaja, najčešće u jednoj sekundi, a može biti i u nekom određenom vremenskom intervalu. Ovaj način se najčešće koristi kod detekcije  $\alpha$  i  $\beta$  – čestica. Mnogo složenija vrsta uređaja je ona koja pokazuje dozu zračenja i on se najčešće koristi za detekciju  $\gamma$  – zračenja i rendgenskog zračenja. [39]

Uređaji za očitavanje mogu biti digitalni ili analogni, a u posljednje vrijeme sve se više koriste moderni uređaji koji su direktno spojeni na računalo ili mrežu. Na samom uređaju najčešće postoji opcija za izradu zvučnih signala koji predstavljaju broj otkrivenih ionizacijskih događaja. Ovi klikovi koje odašilje brojač su lako prepoznatljivi i povezuju se s Geiger – Müllerovim brojačem. [39]

## Plato Geiger – Müllerova brojača

Za Geiger – Müllerov brojač je karakteristično da je broj registriranih impulsa unutar nekih granica malo ovisan o promjeni napona. To naponsko područje naziva se platoom Geiger – Müllerova brojača, a širina mu je od 100 do 300 volti; ukoliko pogledamo sliku 24 to je područje V. Radno područje određuje se tako da se s izvorom srednje jačine mjeri broj otkucaja brojača u ovisnosti o naponu. Za niske napone brojilo ne broji zbog toga što sekundarna ionizacija nije dosegla stupanj koji bi dao dovoljno visoke impulse da premaše prag. Kada se dosegne napon praga, impulsi su još ovisni o početnoj ionizaciji, pa tek neke od upadnih čestica proizvedu dovoljnu početnu ionizaciju za brojanje. Kada se dosegne najniži radni napon, izboj u brojaču prestaje biti ovisan o početnoj ionizaciji. Povećanjem napona amplitude impulsa rastu, ali njihov broj povećava se tek neznatno – zbog povećanja osjetljivog volumena na krajevima brojača. Daljnje povećanje napona uzrokuje neprekidan izboj. Potrebno je izbjegavati ovaj uvjet rada zbog brzog trošenja brojača. [22, 37, 39, 41]

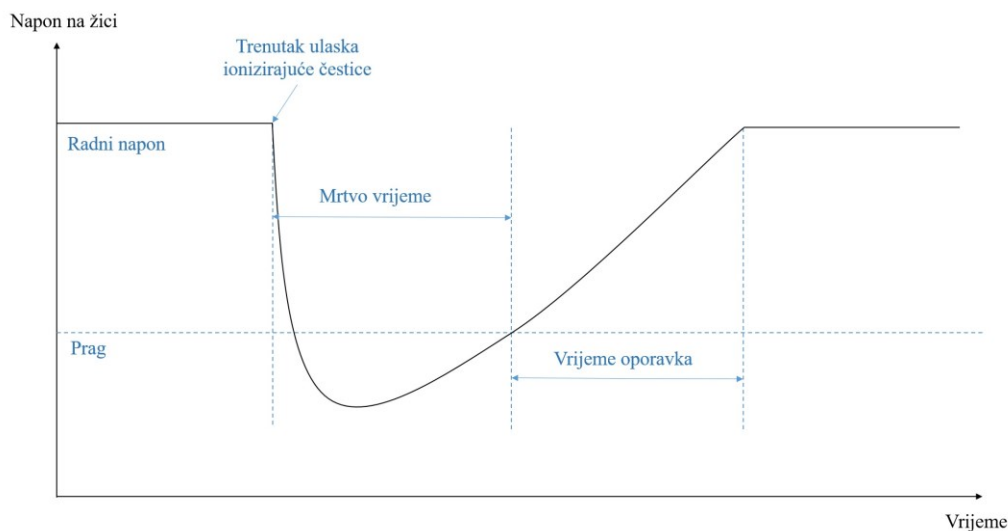
Slika 29 nam prikazuje ovisnost brzine brojanja o naponu. Plato se karakterizira u postotcima porasta brzine brojanja na 100 V. Kod dobrih brojača širina platoa je do 200 V i više, a porast od otprilike 5% na 100V. [37]



Slika 29. Plato Geiger – Müllerova brojača

## Mrtvo vrijeme Geiger – Müllerova brojača

Prolaskom ionizirajuće čestice kroz Geiger – Müllerov brojač nastala je elektronska lavina i oblak pozitivnog naboja oko anode koji relativno sporo putuje prema katodi. Taj oblak smanjuje jakost električnog polja oko anode i polje nije dovoljno jako da bi došlo do sekundarne ionizacije. Mora proći određeno vrijeme dok se ne uspostavi početno električno polje. Ako bi unutar tog vremena kroz Geiger – Müllerov brojač prošla neka ionizirajuća čestica, brojač je ne bi registrirao. Vrijeme za koje brojač ne može registrirati novu česticu naziva se mrtvo vrijeme. Nakon što se oblak pozitivnog naboja udaljio od anode, električno polje poraste, ali još uvijek nema svoju početnu vrijednost. Početnu vrijednost električno polje ima tek kada sav naboj stigne na katodu. Unutar tog vremena brojač može registrirati česticu, ali su impulsi manji nego prvi impuls. To vrijeme se naziva vremenom oporavka. Na slici je prikazan oblik impulsa u Geiger – Müllerovom brojaču. Označeno je mrtvo vrijeme i vrijeme oporavka. Sa slike 30 možemo uočiti da su impulsi nastali unutar vremena oporavka veći što su nastupili kasnije. [37, 39, 41]



Slika 30. Mrtvo vrijeme i vrijeme oporavka Geiger – Müllerova brojača

Mrtvo vrijeme brojača određuje se eksperimentalno. Ako je  $N$  stvarni broj čestica koje su prošle kroz brojač u 1 sekundi, a  $n$  broj registriranih čestica u 1 sekundi, tada vrijeme razlučivanja iznosi  $\tau = \frac{N-n}{n}$ . Kako je teško znati stvarni broj čestica  $N$ , mrtvo vrijeme se određuje eksperimentalno pomoću više mjerenja te koristeći dva izvora nepoznate aktivnosti. Aktivnost svakog od njih

mjerimo zasebno. Ako su  $n_1$  i  $n_2$  mjereni broj otkucaja za izvore 1 i 2, a  $n_{1,2}$  mjereni broj otkucaja za oba izvora zajedno, tada će mrtvo vrijeme biti:

$$\tau = \frac{n_1 + n_2 - n_{1,2}}{2 \cdot n_1 \cdot n_2}$$

[37,39, 41]

### Efikasnost Geiger – Müllerova brojača

Efikasnost Geiger – Müllerova brojača ovisi o vrsti zračenja. Cijev s otvorom može imati gotovo stopostotnu učinkovitost ako se radi o zračenju visokoenergetskih  $\beta$  – čestica. Taj postotak opada kako se smanjuje energija zračenja zbog materijala kojim je prekriven otvor cijevi. [37, 39, 41]

Detekcija  $\alpha$  – čestica će također biti oslabljena zbog materijala kojim je prekriven otvor cijevi. Budući da  $\alpha$  – čestice imaju domet od nekoliko centimetara u zraku, otvor cijevi bi po mogućnosti trebalo postaviti što je moguće bliže izvoru zračenja. Najbolje rezultate dobiti ćemo ako izvor zračenja stavimo na udaljenost od 10 mm ili manje od otvora cijevi. Da bi detektor imao prihvatljivu efikasnost materijal kojim je prekriven otvor cijevi trebao bi imati gustoću od 1,5 mg/cm<sup>3</sup> do 2,0 mg/cm<sup>3</sup>. [39, 41]

Učinkovitost detekcije  $\gamma$  – zračenja i rendgenskog zračenja ovisi o interakciji čestica zračenja s cijevi. Ta učinkovitost se povećava povećanjem atomskog broja materijalu od kojeg je cijev izrađena. Kromirano željezo je materijal koji se najčešće koristi te on ima efikasnost od oko 1% s obzirom na širok raspon energija. [37, 39]

Za detekciju neutrona koristi se druga vrsta Geiger – Müllerove cijevi. Plin koji se ovdje upotrebljava je bor trifluorid ili helij – 3 te se prakticira usporavanje neutrona. Stvaraju se  $\alpha$  – čestice unutar detektora te se na taj način mogu detektirati brzi neutroni. [39]

## Eksperimentalni dio

### Pozadinsko zračenje

**Zadatak:** Odrediti pozadinsko zračenje u učionici pomoću Geiger – Müllerova brojača.

**Pribor koji je korišten:**

- demonstracijska ploča
- držač za ionizacijsku komoru
- ionizacijska komora, tip B
- Geiger – Müllerov brojač

Zemljina atmosfera ispunjena je visokoenergetskim česticama koje dolaze iz svemira. Ovo primarno zračenje uzrokuje sekundarno zračenje u gornjim slojevima zraka koje, iako oslabljeno slojevima zraka, uspijeva doći do površine Zemlje. Pozadinsko zračenje čine kozmičko zračenje i zračenje sa Zemlje. Zračenje sa Zemlje uzrokuju radioaktivni elementi kao što su uranij, torij sa svojim produktima te kalij koji su prisutni u Zemljinoj kori u različitim koncentracijama. Najveći dio tog zračenja čini radioaktivni plin radon.



Slika 31. Demonstracijska ploča na koju je postavljen držač ionizacijske komore te ionizacijska komora tipa B koja je spojena na Geiger – Müllerov brojač



### Postupak izvođenja:

Složimo aparaturu kao na slici. Priključimo Geiger – Müllerov brojač na gradsku mrežu. Uključimo Geiger – Müllerov brojač i pritisnemo gumb koji omogućava zvučni signal svakog impulsa. Namjestimo vrijeme na 60 sekundi te skinemo zaštitnu kapicu s ionizacijske komore. Pritisnemo gumb Start/Stop na Geiger – Müllerovom brojaču. Nakon 60 sekundi očitamo vrijednost s brojača ( $C_0$ ). Nakon toga pritisnemo gumb Reset te opet Start/Stop. Ponovimo postupak kao u prvom mjerenju. Radimo deset mjerenja.

Tablica 1.

Broj mjerenja jedinica	$C_0$	$C_0$
	impulsa/60 s	impulsa/10 s
1.	20	3
2.	27	5
3.	23	4
4.	17	3
5.	20	3
6.	17	3
7.	20	3
8.	20	3
9.	20	3
10.	17	3
$\overline{C_0}$	20	3

### Zaključak:

Iz dobivenih rezultata zaključujemo da i kad nema radioaktivnog izvora Geiger – Müllerov brojač detektira zračenje. To je prirodno zračenje kojem smo svakodnevno izloženi. Vidimo da je srednja vrijednost 20 impulsa u 60 sekundi i da nije konstantna u vremenu, tj. dobivene vrijednosti variraju oko srednje vrijednosti.

## Određivanje mrtvog vremena Geiger – Müllerova brojača

**Zadatak:** Odrediti mrtvo vrijeme Geiger – Müllerova brojača.

**Pribor koji je korišten:**

- demonstracijska ploča
- dva držača za ionizacijsku komoru
- ionizacijska komora, tip B
- Geiger – Müllerov brojač
- dva izvora zračenja: Radij – 226

Izraz po kojem možemo izračunati mrtvo vrijeme glasi:

$$\tau = \frac{n_1 + n_2 - n_{1,2}}{2 \cdot n_1 \cdot n_2}$$

gdje je s  $n_1$  označen broj čestica koje su prošle kroz brojač u jedinici vremena kada imamo izvor radioaktivnosti 1,  $n_2$  broj čestica koje su prošle kroz brojač u jedinici vremena kada imamo izvor radioaktivnosti 2, a  $n_{1,2}$  broj čestica koje su prošle kroz brojač u jedinici vremena kada imamo oba izvora radioaktivnosti.

**Postupak izvođenja:**

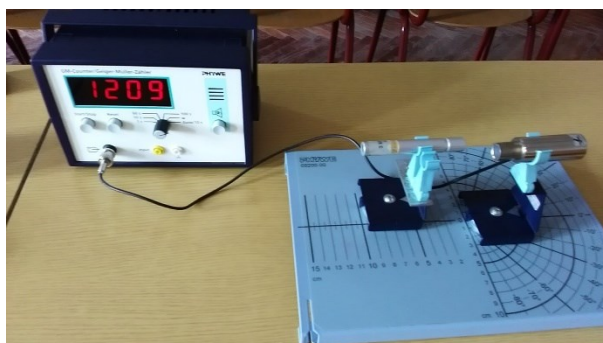
Uzmemo dva izvora zračenja. Prvo stavimo samo jedan izvor te izmjerimo broj impulsa, nakon toga pored njega stavimo i drugi izvor ne mičući prvi te izmjerimo broj impulsa za oba. Nakon toga uklonimo prvi izvor te mjerimo broj impulsa samo za drugi izvor. Broj impulsa mjerimo u 10 sekundi i mjerenje radimo deset puta. Nakon toga dobivene podatke uvrstimo u gornji izraz i dobijemo vrijeme razlučivanja, odnosno mrtvo vrijeme. Udaljenost je bila 2,4 cm.



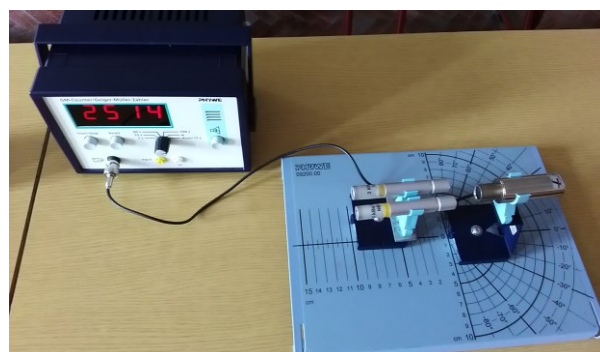
Slika 32. Ra - 226



Slika 33. Dva izvora zračenja koja su korištena



Slika 34. Mjerenje broja impulsa s jednim izvorom



Slika 35. Mjerenje broja impulsa s oba izvora

Tablica 2.

Broj mjerjenja jedinica	Pozadinsko zračenje nije uzeto u obzir			Pozadinsko zračenje uzeto u obzir		
	$C_{1.izvor}$	$C_{2.izvor}$	$C_{oba\ izvora}$	$n_1 = C_{1.izvor} - C_0$	$n_2 = C_{2.izvor} - C_0$	$n_{1,2} = C_{oba\ izvora} - C_0$
	impulsa/10s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s
1.	1247	1302	2528	1244	1299	2525
2.	1238	1398	2566	1235	1395	2563
3.	1221	1312	2483	1218	1309	2480
4.	1250	1346	2506	1247	1343	2503
5.	1214	1387	2560	1211	1384	2557
6.	1222	1333	2541	1219	1330	2538
7.	1162	1369	2528	1159	1366	2525
8.	1237	1300	2534	1234	1297	2531
9.	1230	1372	2531	1227	1369	2528
10.	1198	1359	2531	1195	1356	2528
				$\bar{n}_1 = 1219$	$\bar{n}_2 = 1345$	$\bar{n}_{1,2} = 2528$
				$s = \pm 35$	$s = \pm 37$	$s = \pm 50$

$$n = C - C_0 \quad \bar{n} = \frac{\sum_{m=1}^{50} n}{m} \quad s = \pm \sqrt{\bar{n}}$$

$$\tau = \frac{n_1 + n_2 - n_{1,2}}{2 \cdot n_1 \cdot n_2}$$

$$\tau = \frac{1219 + 1345 - 2528}{2 \cdot 1219 \cdot 1345} = 1,0979 \cdot 10^{-5} \text{s} \cong 11 \mu\text{s}$$

### Zaključak:

Iz dobivenih rezultata vidimo da je vrijeme razlučivanja malo, 11  $\mu\text{s}$ , no i u tom kratkom vremenskom intervalu se može dogoditi da kroz brojač prođe još neka čestica koju brojač tada neće detektirati.

## Ovisnost broja detektiranih čestica o udaljenosti

**Zadatak:** Odrediti ovisnost broja detektiranih radioaktivnih čestica o udaljenosti pomoću Geiger – Müllerova brojača.

**Pribor koji je korišten:**

- demonstracijska ploča
- držač za ionizacijsku komoru
- ionizacijska komora, tip B
- Geiger – Müllerov brojač
- Radij – 226

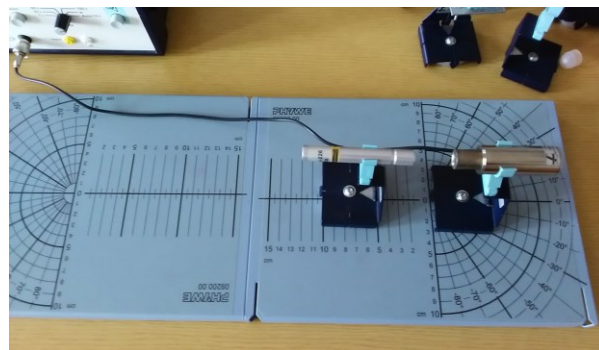
Broj detektiranih čestica smanjuje se obrnuto proporcionalno s kvadratom udaljenosti:

$$\bar{C} = \frac{1}{r^2} \cdot \mu$$

gdje je  $\bar{C}$  broj detektiranih čestica,  $r$  je udaljenost, a  $\mu$  je konstanta koja je karakteristična za svaki izvor zračenja.

**Postupak izvođenja:**

Uzmemo izvor zračenja te ga stavljamo na različite udaljenosti od detektora. Krećemo od 1 cm te povećavamo udaljenost za po jedan centimetar sve do 20 cm. Broj impulsa mjerimo u 10 sekundi i za svaku udaljenost mjerenje radimo deset puta.



Slika 36. Postav pokusa

Tablica 3.

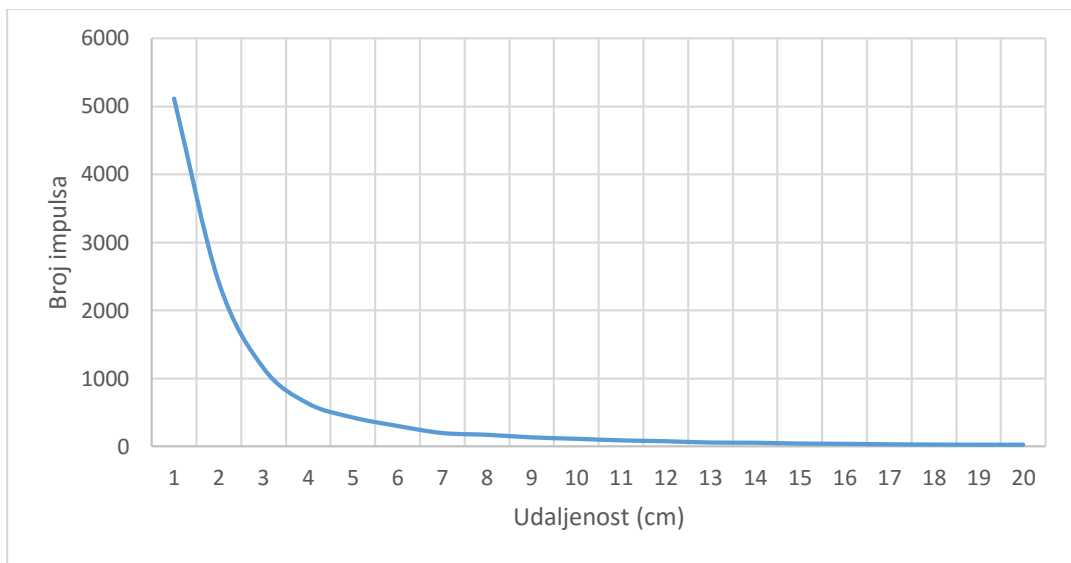
Pozadinsko zračenje nije uzeto u obzir:

Br. mjer enja jedin ica	$C_1$ cm	$C_2$ cm	$C_3$ cm	$C_4$ cm	$C_5$ cm	$C_6$ cm	$C_7$ cm	$C_8$ cm	$C_9$ cm	$C_{10}$ cm	$C_{11}$ cm	$C_{12}$ cm	$C_{13}$ cm	$C_{14}$ cm	$C_{15}$ cm	$C_{16}$ cm	$C_{17}$ cm	$C_{18}$ cm	$C_{19}$ cm	$C_{20}$ cm
	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s	impu lsa/1 0 s
1.	5032	2399	1137	674	461	308	234	172	146	118	104	82	50	57	44	46	46	36	36	27
2.	5128	2456	1178	655	432	307	219	185	166	125	103	96	52	59	40	39	33	40	29	23
3.	5136	2348	1117	621	441	291	230	164	159	107	92	75	59	68	49	44	36	33	38	30
4.	5077	2420	1137	673	391	305	253	170	128	132	101	92	59	66	50	36	38	34	31	33
5.	5170	2390	1176	572	444	321	241	165	143	111	99	83	69	62	46	44	33	29	26	26
6.	5067	2404	1150	640	449	299	224	200	108	112	86	79	61	61	49	36	37	32	32	22
7.	5188	2444	1165	602	421	319	245	178	136	104	93	81	72	55	50	44	44	26	24	24
8.	5126	2402	1162	625	432	306	206	177	128	130	86	76	64	55	49	61	36	33	37	30
9.	5226	2518	1214	641	416	296	267	199	125	115	101	83	77	55	53	48	36	32	35	24
10.	5060	2439	1145	662	431	315	193	162	151	125	89	71	62	60	47	38	33	37	23	25

Tablica 4.

Pozadinsko zračenje uzeto u obzir:

Br. mjer enja  jedin ica	$C_{1\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{2\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{3\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{4\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{5\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{6\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{7\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{8\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{9\text{ cm}}$ – $C_0$	$C_{10}$ cm – $C_0$	$C_{11}$ cm – $C_0$	$C_{12}$ cm – $C_0$	$C_{13}$ cm – $C_0$	$C_{14}$ cm – $C_0$	$C_{15}$ cm – $C_0$	$C_{16}$ cm – $C_0$	$C_{17}$ cm – $C_0$	$C_{18}$ cm – $C_0$	$C_{19}$ cm – $C_0$	$C_{20}$ cm – $C_0$
	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1	impu lsa/1
	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s
1.	5029	2396	1134	671	458	305	231	169	143	115	101	79	47	54	41	43	43	33	33	24
2.	5125	2453	1175	652	429	304	216	182	163	122	100	93	49	56	37	36	30	37	26	20
3.	5133	2345	1114	618	438	288	227	161	156	104	89	72	56	65	46	41	33	30	35	27
4.	5074	2417	1134	670	388	302	250	167	125	129	98	89	56	63	47	33	35	31	28	30
5.	5167	2387	1173	569	441	318	238	162	140	108	96	80	66	59	43	41	30	26	23	23
6.	5064	2401	1147	637	446	296	221	197	105	109	83	76	58	58	46	33	34	29	29	19
7.	5185	2441	1162	599	418	316	242	175	133	101	90	78	69	52	47	41	41	23	21	21
8.	5123	2399	1159	622	429	303	203	174	125	127	83	73	61	52	46	58	33	30	34	27
9.	5223	2515	1211	638	413	293	264	196	122	112	98	80	74	52	50	45	33	29	32	21
10.	5057	2436	1142	659	428	312	190	159	148	122	86	68	59	57	44	35	30	34	20	22
$\bar{C}$	5118	2419	1155	634	429	304	288	174	136	115	92	79	60	57	45	41	34	30	28	23



Grafikon 1. Ovisnost detektiranih radioaktivnih čestica o udaljenosti

### **Zaključak:**

Iz grafikona lagano možemo uočiti kako se na početku mjerenja broj očitanih impulsa naglo smanjivao. To se događalo kada su udaljenosti bile male, svega nekoliko centimetara. Kako smo povećavali udaljenost, broj registriranih impulsa nije više tako naglo opadao te se pred kraj samog mjerenja gotovo ustalio tj. nije bilo većih promjena u broju registriranih impulsa. Mjerenjima smo potvrdili jednadžbu  $\bar{C} = \frac{1}{r^2} \cdot \mu$ , odnosno da je broj detektiranih čestica obrnuto proporcionalan s kvadratom udaljenosti izvora radioaktivnih čestica od detektora.



## Detekcija zračenja različitih izvora na istoj udaljenosti

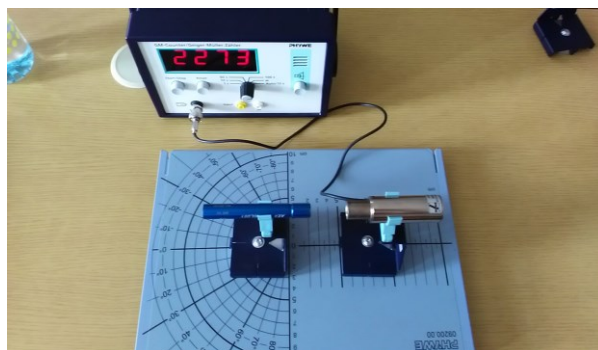
**Zadatak:** Odrediti broj impulsa za različite izvore zračenja koji se nalaze na istoj udaljenosti od Geiger – Müllerova brojača.

### Pribor koji je korišten:

- demonstracijska ploča
- držač za ionizacijsku komoru
- ionizacijska komora, tip B
- Geiger – Müllerov brojač
- izvori zračenja: Co – 60, Na – 22, Am – 241 i Sr - 90

### Postupak izvođenja:

Uzmemo izvore zračenja te ih stavljamo na iste udaljenosti od detektora. Udaljenost za sve vrste izvora je 1 cm. Svi izvori koji se koriste u ovom pokusu imaju istu aktivnost i ona iznosi 74 kBq. Broj impulsa mjerimo u 10 sekundi i za svaki izvor zračenja radimo deset puta.



Slika 37. Sr – 90

Tablica 5.

Pozadinsko zračenje nije uzeto u obzir				
Broj mjerenja Jedinica	$C_{Co-60}$	$C_{Na-22}$	$C_{Am-241}$	$C_{Sr-90}$
	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s
1.	132	704	194	9965
2.	131	668	203	9950
3.	129	712	217	9898
4.	144	671	227	9897
5.	152	667	216	9873
6.	144	659	201	9890
7.	126	683	204	9840
8.	143	673	196	9918
9.	129	681	218	9959
10.	157	691	221	9840

Tablica 6.

Pozadinsko zračenje uzeto u obzir				
Broj mjerenja	$C_{Co-60} - C_0$	$C_{Na-22} - C_0$	$C_{Am-241} - C_0$	$C_{Sr-90} - C_0$
Jedinica	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s
1.	129	701	191	9962
2.	128	665	200	9947
3.	126	709	214	9895
4.	141	668	224	9894
5.	149	664	213	9870
6.	141	656	198	9887
7.	123	680	201	9837
8.	140	670	193	9915
9.	126	678	215	9956
10.	154	688	218	9837
$\bar{C}$	136	678	207	9900

### Zaključak:

Americij je  $\alpha$  i  $\gamma$  – emiter, dok su kobalt, natrij i stroncij  $\beta$  i  $\gamma$  – emiteri. Budući da je učinkovitost detekcije  $\gamma$  – čestica tek 1% obratit ćemo pažnju na energije zračenja  $\alpha$  – čestica kod americija te  $\beta$  – čestica kod kobalta, natrija i stroncija. Kobalt ima najmanji broj registriranih čestica, ali i najmanju energiju zračenja  $\beta$  – čestica, ona iznosi 317 keV. Sljedeći po broju registriranih čestica je americij, ali ne i po energiji zračenja. Energija zračenja  $\alpha$  – čestica kod americija iznosi 5578 keV. Mali broj registriranih čestica u ovom slučaju je zbog velikog vremena poluraspada ili zbog slabe efikasnosti Geiger – Müllerova brojača za  $\alpha$  – čestice. Nakon americija ide natrij s 678 registriranih čestica, njegova energija zračenja je 546 keV. Najviše registriranih čestica dobili smo kod stroncija čija je energija zračenja  $\beta$  – čestica 2830 keV. [43, 44, 45, 46]

## Prolazak $\alpha$ , $\beta$ i $\gamma$ – zračenja kroz različite materijale

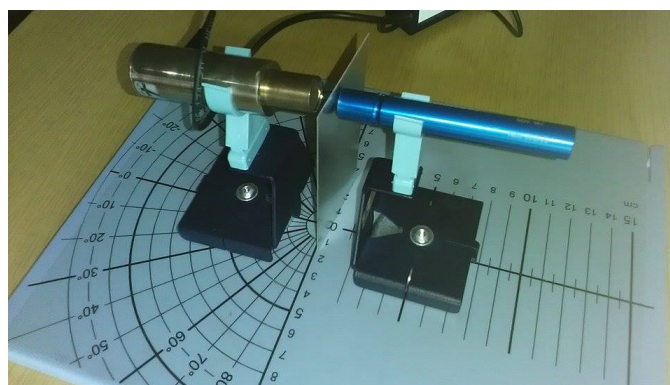
**Zadatak:** Provjerit koje od zračenja će proći kroz papir, aluminijsku pločicu i olovnu pločicu.

**Pribor koji je korišten:**

- demonstracijska ploča
- držač za ionizacijsku komoru
- ionizacijska komora, tip B
- Geiger – Müllerov brojač
- izvori zračenja: Am – 241 i Sr – 90
- papir, aluminijska pločica i olovna pločica

**Postupak izvođenja:**

Uzmemo izvore zračenja te ih stavljamo na istu udaljenost od detektora. Udaljenost od izvora do detektora je 1 cm. Izvori koji se koriste u ovom pokusu imaju istu aktivnost i ona iznosi 74 kBq. Između izvora i detektora stavljamo različite materijale: papir debljine 0,170 mm, aluminijska pločica debljine 0,470 mm i olovna pločica debljine 1 mm. Na slici 8 možemo vidjeti koja bi zračenja trebala proći kroz pojedini materijal, a koja su zaustavljena. Broj impulsa mjerimo u 10 sekundi i za svaki izvor zračenja radimo deset puta.



Slika 38. Sr – 90 i aluminijska pločica

Tablica 7.

Pozadinsko zračenje nije uzeto u obzir				Pozadinsko zračenje uzeto u obzir		
Broj mjerenja	$C_{Sr-90, \text{ papir}}$	$C_{Sr-90, \text{ aluminij}}$	$C_{Sr-90, \text{ olovo}}$	$C_{Sr-90, \text{ papir}} - C_0$	$C_{Sr-90, \text{ aluminij}} - C_0$	$C_{Sr-90, \text{ olovo}} - C_0$
Jedinica	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s
1.	9534	5856	11	9531	5853	8
2.	9343	5872	10	9340	5869	7
3.	9345	5925	11	9342	5922	8
4.	9361	5789	7	9358	5789	4
5.	9246	5909	11	9243	5906	8
6.	9236	5876	8	9233	5873	5
7.	9306	5737	9	9303	5734	6
8.	9302	5833	9	9299	5830	6
9.	9329	5837	12	9326	5834	9
10.	9391	5793	10	9388	5790	7
			$\bar{C}$	9336	5840	7

Tablica 8.

Pozadinsko zračenje nije uzeto u obzir				Pozadinsko zračenje uzeto u obzir		
Broj mjerenja Jedinica	$C_{Am-241, \text{ papir}}$	$C_{Am-241, \text{ aluminij}}$	$C_{Am-241, \text{ olovo}}$	$C_{Am-241, \text{ papir}} - C_0$	$C_{Am-241, \text{ aluminij}} - C_0$	$C_{Am-241, \text{ olovo}} - C_0$
	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s	impulsa/10 s
1.	107	72	11	104	69	8
2.	111	65	6	108	62	3
3.	112	73	4	109	70	1
4.	105	60	5	102	57	2
5.	96	65	4	93	62	1
6.	117	57	4	114	54	1
7.	107	72	4	104	69	1
8.	104	63	7	101	60	3
9.	101	73	4	98	70	1
10.	114	73	4	111	70	1
			$\bar{C}$	104	64	2

## **Zaključak:**

Stroncij zrači  $\gamma$  – čestice i  $\beta^-$  – čestice. Kada nema nikakvog materijala između izvora zračenja i detektora imamo 9900 impulsa u 10 sekundi, kada stavimo papir imamo registrirano 9336 impulsa u 10 sekundi, s aluminijem detektiramo 5840 impulsa u deset sekundi i kada stavimo olovnu pločicu registriramo samo 7 impulsa u 10 sekundi. Iz toga vidimo da papir zaustavi jako malo čestica, većina ih prolazi, ali budući da stroncij ne emitira  $\alpha$  – čestice to smo mogli i očekivati jer  $\beta^-$  – čestice i  $\gamma$  – čestice prolaze kroz papir. Kod aluminijske pločice zaustavi se gotovo pola čestica. Aluminij bi trebao zaustaviti sve  $\alpha$  i  $\beta^-$  – čestice, a propustiti samo  $\gamma$  – čestice. Kada smo stavili olovnu pločicu zaustavljene su gotovo sve čestice kao što smo mogli pretpostaviti da će biti.

Americij zrači  $\gamma$  – čestice i  $\alpha$  – čestice. Kada nema nikakvog materijala između izvora zračenja i detektora imamo 207 impulsa u 10 sekundi, kada stavimo papir imamo registrirano 104 impulsa u 10 sekundi, s aluminijem detektiramo 64 impulsa u deset sekundi i kada stavimo olovnu pločicu registriramo samo 2 impulsa u 10 sekundi. Papir bi trebao zaustaviti sve  $\alpha$  – čestice, a aluminijska pločica sve  $\alpha$  i  $\beta^-$  – čestice. Budući da kod americija nema  $\beta^-$  – čestica trebali bi dobiti isti broj registriranih čestica za papir i aluminijsku pločicu, ali nije tako. Iz toga možemo zaključiti da papir ipak ne zaustavlja sve  $\alpha$  – čestice, tek ih aluminijska pločica zaustavi. Kao i kod stroncija, olovna pločica je zaustavila gotovo sve čestice.

## Zaključak

Iako zračenje ima mnoge štetne učinke na čovjeka i njegovu okolinu, otkriće zračenja iznimno je važno i korisno jer je pronašlo vrlo široku primjenu u medicini, industriji te znanstvenim i tehnološkim istraživanjima. Jedna od glavnih uporaba zračenja je u nuklearnoj medicini za otkrivanje bolesti te liječenje raka. Korištenjem rendgenskih zraka iz rendgenskih uređaja mogu se dobiti slike različitih organa i tkiva ljudskog tijela koji pomažu liječnicima u postavljanju dijagnoza. Također primjena zračenja u industriji je mnogobrojna. Pomoću  $\gamma$  – zračenja moguće je odrediti debljinu danog materijala. Zračenje se još koristi u zrakoplovstvu za testiranje mlaznih motora, u industriji nafte, plina i rudarstva te u mnogim drugim industrijama. Još jedna od korisnih primjena je za otkrivanje mina te u detektorima dima.

Iz navedenog se vidi da se zračenje nalazi svuda oko nas te su nam zbog toga potrebni uređaji koji će detektirati to zračenje i reći nam koliko smo ozračeni ili o kojoj vrsti zračenja se radi. Jedan od bitnijih uređaja korišten u tu svrhu je Geiger – Müllerov brojač. Upravo ovaj uređaj se često koristi jer je po cijeni pristupačan, izdržljiv je te ga je zbog njegovih malih dimenzija lako prenositi s jednog mjesta na drugo. Također je vrlo pouzdan te može detektirati sve vrste zračenja. S druge strane njegovi glavni nedostaci su to da nam ne može reći o kojoj se točno vrsti zračenja radi, ne može otkriti kolika je energija detektiranog zračenja te mu je efikasnost niska, posebno za  $\gamma$  – čestice.

Na Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku koriste se Geiger – Müllerovi brojači. S jednim od tih uređaja rađeni su eksperimenti iz ovog rada, a koriste se i tijekom izvođenja nastave na preddiplomskom studiju u kolegiju Praktikum iz osnova fizike B, dok na diplomskom studiju u kolegiju Viši fizikalni praktikum. Stoga se nadam kako će ovaj diplomski rad donijeti budućim generacijama studenata bolje razumijevanje principa rada Geiger - Müllerova brojača i njegovo korištenje.



## Literatura

- [1] Jakobović, Z. Ionizirajuće zračenje i čovjek. Zagreb : Školska knjiga, 1991.
- [2] Ionizacija // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=27752> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [3] Henri Becquerel – Biographical  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-bio.html)  
(Dostupno: 13.07.2016.)
- [4] Becquerel, Antoine Henri// Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=6538> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [5] Maria Curie // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=12996> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [6] Marie and Pierre Curie and the Discovery of Polonium and Radium  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/themes/physics/curie/index.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/curie/index.html)  
(Dostupno: 13.07.2016.)
- [7] Radioaktivnost // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [8] Ernest Rutherford // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=53791> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [9] Ionizirajuće zračenje // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27754> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [10] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, Republika Hrvatska. 2012.-2013.  
[http://cms.dzrns.hr/zastita\\_od\\_zracenja/izvori](http://cms.dzrns.hr/zastita_od_zracenja/izvori) (Dostupno: 13.07.2016.)
- [11] Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja.  
<http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/librenjak/izvori.htm> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [12] Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja.  
<http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/librenjak/umjetni.htm> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [13] Elektromagnetni spektar.  
[http://www.megon.net/docs/1\\_tko\\_to\\_tamo\\_zraci/osnove\\_o\\_zracenju.htm](http://www.megon.net/docs/1_tko_to_tamo_zraci/osnove_o_zracenju.htm)  
(Dostupno: 20.08.2016.)
- [14] Hard X-Rays, 2011.  
<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/xray.htm> (Dostupno: 13.07.2016.)

- [15] Rendgensko zračenje // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=52438> (Dostupno: 13.07.2016.)
- [16] Gama zračenje // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=21168> (Dostupno: 15.07.2016.)
- [17] What Are Gamma-Rays?  
<http://www.livescience.com/50215-gamma-rays.html> (Dostupno: 15.07.2016.)
- [18] Alfa zračenje // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=1643> (Dostupno: 15.07.2016.)
- [19] Ionizirajuće zračenje u biosferi.  
<http://personal.unizd.hr/~mdzela/nastava/KTF.pdf> (Dostupno: 15.07.2016.)
- [20] Beta zračenje // Hrvatska enciklopedija online 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=7314> (Dostupno: 15.07.2016.)
- [21] Neutronska zračenje // Hrvatska enciklopedija online 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=43591> (Dostupno: 18.07.2016.)
- [22] Detekcija i zaštita od zračenja.  
[https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/Detekcija\\_i\\_zastita\\_od\\_zracenja.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Detekcija_i_zastita_od_zracenja.pdf)  
(Dostupno: 13.07.2016.)
- [23] Wilsonova komora. // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=66207> (Dostupno: 18.07.2016.)
- [24] Griffith Observatory. Cosmic rays.  
[http://griffithobservatory.org/exhibits/edgeofspace\\_cosmicrays.html](http://griffithobservatory.org/exhibits/edgeofspace_cosmicrays.html)  
(Dostupno: 18.07.2016.)
- [25] Komora s mjehurićima // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=32604> (Dostupno: 25.07.2016.)
- [26] Čerenkovljevo zračenje // Hrvatsko strukovno nazivlje online, 2016.  
<http://struna.ihjj.hr/naziv/cerenkovljevo-zracenje/11745/#naziv> (Dostupno: 25.07.2016.)
- [27] Čerenkovljevo zračenje // Hrvatsko strukovno nazivlje online, 2016.  
<http://struna.ihjj.hr/naziv/cerenkovljevo-zracenje/11745/#naziv> (Dostupno: 25.07.2016.)
- [28] Scintilacijsko brojilo // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=55064> (Dostupno: 27.07.2016.)
- [29] Poluvodiči // Hrvatska enciklopedija online, 2016.

- <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49299> (Dostupno: 30.07.2016.)
- [30] Poluvodička brojila // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49300> (Dostupno: 30.07.2016.)
- [31] High Purity Germanium and Silicon Lithium Radiation Detectors.  
<http://www.ortec-online.com/Products-Solutions/RadiationDetectors/Overview.aspx>  
(Dostupno: 30.07.2016.)
- [32] Ionizacijska komora // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=27753>  
(Dostupno: 27.07.2016.)
- [33] Proporcionalno brojilo // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=50674> (Dostupno: 30.07.2016.)
- [34] Hans Geiger Facts.  
<http://biography.yourdictionary.com/hans-geiger> (Dostupno: 02.08.2016.)
- [35] Hans Geiger—German Physicist and the Geiger Counter.  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3228631> (Dostupno: 02.08.2016.)
- [36] Walther Müller  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Walther\\_M%C3%BCller](https://en.wikipedia.org/wiki/Walther_M%C3%BCller) (Dostupno: 02.08.2016.)
- [37] G-M brojač  
[https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/2\\_G.M.\\_brojac.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/2_G.M._brojac.pdf)  
(Dostupno: 02.08.2016.)
- [38] Geiger - Müllerovo brojilo // Hrvatska enciklopedija online, 2016.  
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=21512> (Dostupno: 02.08.2016.)
- [39] Radiation Geiger Counter, Principles, Readout, Limitations, Types, Where And What To Purchase.  
<http://www.agreenroadjournal.com/2013/01/geiger-counter-principles-readout.html>  
(Dostupno: 04.08.2016.)
- [40] Geiger counters.  
<http://www.explainthatstuff.com/how-geiger-counters-work.html>  
(Dostupno: 04.08.2016.)
- [41] Introduction to Geiger Counters  
<https://www.cpp.edu/~pbsiegel/phy432/labman/geiger.pdf> (Dostupno: 04.08.2016.)

[42] Geiger-Mueller (GM) Tubes.

<https://www.ornl.gov/ptp/collection/GMs/GMs.htm> (Dostupno: 04.08.2016.)

[43] Table de Radionucleides . Co – 60.

[http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Co-60\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Co-60_tables.pdf) (Dostupno: 22.08.2016.)

[44] Table de Radionucleides . Na – 22.

[http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Na-22\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Na-22_tables.pdf) (Dostupno: 22.08.2016.)

[45] Table de Radionucleides . Sr – 90.

[http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Sr-90\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Sr-90_tables.pdf) (Dostupno: 22.08.2016.)

[46] Table de Radionucleides . Am – 241.

[http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Am-241\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Am-241_tables.pdf)

(Dostupno: 22.08.2016.)

## Životopis

Maja Sudar rođena je 06.05.1992. godine u Našicama. Pohađala je Osnovnu školu Ivana Kukuljevića u Belišću, te nakon toga upisuje Opću gimnaziju u Srednjoj školi Valpovo. Nakon završene gimnazije kao redovan student upisuje Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Preddiplomski studij završava 2014. godine te iste godine upisuje Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike. U slobodno vrijeme aktivno se bavi kajakom i postiže zapažene rezultate.